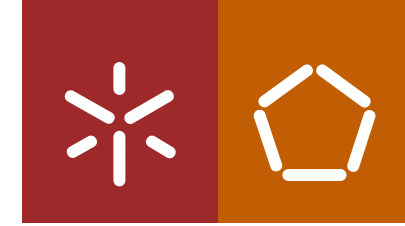




João Pedro da Silva Teles Braga

Desenvolvimento de uma técnica  
de soldadura para restauro de sinos

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Pedro da Silva Teles Braga

Desenvolvimento de uma técnica  
de soldadura para restauro de sinos

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor Delfim Soares  
Professor Doutor Joaquim Barbosa

Novembro de 2012

## DECLARAÇÃO

Nome: João Pedro da Silva Teles Braga

Correio electrónico: a48302@alunos.uminho.pt

Tel./Tlm.: 966881983

Número do Bilhete de Identidade: 13218818

Título da dissertação: Desenvolvimento de uma técnica de soldadura para restauro de sinos

Ano de conclusão: 2012

Orientador(es): Delfim Soares; Joaquim Barbosa

Designação do Mestrado:

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Especialização: Conceção e Estruturas

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

## **Agradecimentos**

A realização do presente trabalho apenas foi possível, com a cooperação de algumas pessoas, às quais deixo aqui o meu muito obrigado.

Ao Professor Doutor Delfim Soares meu orientador e ao Professor Doutor Joaquim Barbosa meu coorientador, pela colaboração, transmissão de conhecimento e experiência, sugestões e críticas ao longo da realização deste trabalho.

Ao Vítor Neto pela ajuda na parte de maquinaria e de operações de corte, ao Miguel Abreu pelo apoio no polimento e na obtenção das micrografias das amostras, ao André Alves pelo apoio prestado nos ensaios de soldadura e ao Paulo Pinto pela ajuda na programação do forno

À empresa Jerónimos, Carlos & Luís Jerónimo Lda., pela oportunidade dada para o desenvolvimento desta dissertação.

Um obrigado também à Sara Martins pelo apoio e força ao longo de todo este trabalho e finalmente um obrigado aos meus pais pela ajuda ao longo do meu percurso académico.



## Resumo

O restauro de sinos fissurados por soldadura é um serviço que não existe em Portugal. O bronze dos sinos é uma liga constituída aproximadamente por 80 % de cobre e 20 % de estanho, e é considerada inadequada para a soldadura, não existindo assim nenhuma norma ou procedimento para a soldadura deste tipo de liga. Neste trabalho pretende-se determinar o efeito dos parâmetros de soldadura sobre as características da junta soldada e a qualidade final do restauro de sinos.

Após uma breve introdução, realçando os modos de falha e o restauro dos sinos, é efetuada uma pesquisa sobre o bronze. Seguidamente são abordados alguns conceitos da metalurgia da soldadura, e os procedimentos e normas existentes, para a soldadura de bronzes

Depois do estudo preliminar, são efetuados 20 ensaios de soldadura em chapas de bronze, com a variação dos seguintes parâmetros: temperatura de pré-aquecimento, velocidade arrefecimento, material de adição e intensidade de corrente. A técnica de soldadura utilizada foi a TIG, e para o fabrico do material de adição, foi usado a fundição em moldação permanente.

Nas amostras obtidas foram analisadas as alterações provocadas pela variação dos diferentes parâmetros, a nível da junta da soldadura, nomeadamente, na microestrutura e na microdureza.

Conclui-se que a soldadura com 110 A facilita a operação de soldadura evitando a falta de penetração, a formação de porosidades e a fissuração a quente. O pré-aquecimento parece evitar o efeito de fissuração a quente, embora os resultados não sejam conclusivos relativamente à temperatura a usar. Da mesma forma a diminuição da velocidade de arrefecimento parece diminuir a tendência à fissuração após soldadura. A composição química do material de adição deve ser o mais próximo possível do metal base.

**Palavras-chave:** Sinos fissurados, soldadura, soldabilidade, bronze, Bell metal, TIG, pré-aquecimento, restauro, metal de adição

## Abstract

The welding repair of cracked bells is a service that doesn't exist in Portugal. The bronze of the bells is constituted by approximately 80 % copper and 20 % tin, being considered unsuitable for welding, therefore, there are no standards or procedures for the welding of this type of alloy. In this study is intended to determine the effects of the welding parameters of the characteristics of the welded joint and his quality.

After a brief introduction, highlighting the failure modes and the welding repair of bells, a research is carried out on bronze. Then there are discussed some concepts of welding metallurgy, and the procedures and standards for the welding of bronzes

After the preliminary study, 20 welding tests were made on bronze plates, ranging different parameters: the preheating temperature, the cooling rate, the filler metal and the current intensity. The welding technique used was TIG, and to the manufacture of the filler metal was used permanent mold casting.

The samples were analyzed with the changes caused by the variation of different parameters at the weld joint, particularly in the microstructure and microhardness.

It was concluded that using 110 A in the welding operation avoids the lack of penetration, the formation of porosities and hot cracking. Preheating seems to avoid the effect of hot cracking although the results are not conclusive concerning the temperature to use. Likewise the decrease in cooling rate appears to reduce the tendency to cracking after welding. The filler material chemical composition should be the closest as possible to the base metal.

**Keywords:** cracked bells, Welding, Weldability, bronze, bell metal, TIG, filler metal, pre-heating, repair.



## ÍNDICE

|  |     |
|--|-----|
| Agradecimentos.....                          | iii |
| Resumo.....                                  | v   |
| Abstract.....                                | vi  |
| ÍNDICE .....                                 | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                       | x   |
| ÍNDICE DE TABELAS .....                      | xiv |
| 1. Introdução.....                           | 1   |
| 1.1. História dos sinos.....                 | 2   |
| 1.2. Modos de falha .....                    | 3   |
| 1.2.1. Restauro de sinos por soldadura.....  | 5   |
| 1.3. Objetivos.....                          | 7   |
| 2. Ligas de bronze .....                     | 9   |
| 2.1. Microestrutura do bronze.....           | 11  |
| 2.2 Tratamentos térmicos.....                | 14  |
| 2.3. Propriedades.....                       | 15  |
| 2.4. Bell Metal.....                         | 18  |
| 2.5. Fundição.....                           | 18  |
| 3. Fundamentos da soldadura.....             | 21  |
| 3.1. Bases metalúrgicas da soldadura .....   | 22  |
| 3.1.1. Ciclo térmico da soldadura.....       | 22  |
| 3.1.2. Poça de fusão .....                   | 24  |
| 3.1.3. Entrega térmica .....                 | 25  |
| 3.1.4. Pré-aquecimento.....                  | 25  |
| 3.1.5. Solidificação do cordão .....         | 26  |
| 3.1.6. Zona termicamente afetada (ZTA) ..... | 27  |

|   |    |
|---|----|
| 3.2. Soldadura do cobre e suas ligas .....                          | 28 |
| 3.2.1. Fatores que afetam a soldabilidade .....                     | 30 |
| 3.2.2. Soldadura do bronze .....                                    | 31 |
| 4. Procedimentos experimentais .....                                | 35 |
| 4.1. Preparação dos provetes .....                                  | 35 |
| 4.2. Fabrico do material de adição.....                             | 37 |
| 4.2.1. Moldação em areia de silicato de sódio/CO <sub>2</sub> ..... | 38 |
| 4.2.2. Fundição em moldação permanente .....                        | 40 |
| 4.3. Ensaio de soldadura .....                                      | 42 |
| 4.3.1. Preparação da junta .....                                    | 42 |
| 4.3.2. Procedimentos e parâmetros de soldadura .....                | 42 |
| 4.4. Preparação das amostras para análise metalográfica .....       | 44 |
| 4.4.1. Corte e identificação das amostras .....                     | 45 |
| 4.4.2. Polimento .....  | 45 |
| 4.4.3. Ataque químico .....   | 46 |
| 4.5. Ensaio de microdureza.....                                     | 47 |
| 5. Análise e discussão dos resultados .....                         | 49 |
| 5.1 Material de adição .....  | 49 |
| 5.2 Influência das condições de soldadura .....                     | 51 |
| 5.2.1. Definição dos parâmetros bases de soldadura .....            | 52 |
| 5.2.2. Efeito da temperatura de pré-aquecimento .....               | 55 |
| 5.2.3. Efeito da velocidade de arrefecimento.....                   | 61 |
| 5.2.4. Efeito da variação da intensidade .....                      | 67 |
| 6. Conclusão .....  | 79 |
| 7. Trabalhos futuros.....   | 81 |
| Referências .....   | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| ANEXOS.....                                      | 85  |
| Anexo 1 - Propriedades das ligas de bronze ..... | 86  |
| Anexo 2 - Desenho técnico da coquilha .....      | 89  |
| Anexo 3 - Microestrutura das amostras .....      | 91  |
| Anexo 4 - Durezas das amostras .....             | 100 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1- Partes constituintes de um sino.....  | 3  |
| Figura 1.2- Exemplos de restauro de sinos por soldadura. ....   | 6  |
| Figura 2.1- Diagrama de equilíbrio da liga Cu-Sn. ....  | 11 |
| Figura 2.2- Constituintes $\alpha$ e $\delta$ de uma liga Cu-Sn.....  | 14 |
| Figura 2.3- Variação das propriedades mecânicas das ligas de bronze.....  | 15 |
| Figura 3.1- Classificação dos processos de soldadura segundo a AWS 21   |    |
| Figura 3.2- Grandezas relativas ao ciclo térmico de soldadura .....   | 23 |
| Figura 3.3- Repartição térmica de cada um dos lados da soldadura e definição da ZTA 23                                      |    |
| Figura 3.4- Estimativa da diluição a partir da geometria da soldadura: a) junta topo a topo; b) junta com chanfro em V..... | 25 |
| Figura 4.1- Lingote de bronze. ....   | 36 |
| Figura 4.2- Equipamento de corte discotom <i>STRUERS</i> .....  | 37 |
| Figura 4.3- Representação esquemática do corte dos provetes. ....   | 37 |
| Figura 4.4: “Chassis” utilizado para a moldação em areia de silicato de sódio/co <sub>2</sub> .....                         | 39 |
| Figura 4.5: Mufla utilizada na fusão bronze .....   | 39 |
| Figura 4.6- Esquema da coquilha.....  | 40 |
| Figura 4.7- Coquilha utilizada no fabrico das varetas: a) Vista lateral; b) Vista de topo; c) Canais de escape.....         | 40 |
| Figura 4.8- Mufla utilizada no pré-aquecimento da coquilha.....   | 41 |
| Figura 4.9- Configuração da junta de soldadura dos provetes .....   | 42 |
| Figura 4.10- Equipamento <i>MasterTig MLS ACDC</i> .....  | 43 |
| Figura 4.11- Componentes usados nos ensaios de soldadura: a) mufla; b) Garrafa de argon; c) mesa de soldadura. ....         | 43 |
| Figura 4.12- Esquema do procedimento de soldadura.....  | 43 |
| Figura 4.13- Microscópio ótico <i>ZEISS Axiotech (hal 100)</i> .....  | 44 |
| Figura 4.14- Esquema da divisão das amostras em diferentes zonas. ....  | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.15- Esquema de corte das amostras. ....  | 45 |
| Figura 4.16- Equipamento de polimento <i>PRESI MECAPOL</i> .....  | 46 |
| Figura 4.17: Equipamento microindentador <i>Shimadzu</i> . ....   | 47 |
| Figura 4.18- Representação esquemática da distribuição das indentações nas amostras .....   | 47 |
| Figura 5.1- Resultado da fundição por moldação em areia de silicato de sódio/CO <sub>2</sub> . ....   | 50 |
| Figura 5.2- Varetas de bronze fabricadas a partir do material base. ....  | 50 |
| Figura 5.3: Vareta de bronze fabricada a partir do metal base c/ + 5% de Sn. ....   | 50 |
| Figura 5.4- Micografias do metal base: a) variação do padrão das dendrites; b) Dendrites e constituinte eutetóide em pormenor. ....   | 52 |
| Figura 5.5- Fusão incompleta dos ensaios de teste, soldados a 110 A e com pré-aquecimento de 250 °C: a) amostra 1 arrefecida ao ar; b) amostra 2 arrefecida no forno a partir de 250 °C. ..                                   | 53 |
| Figura 5.6- Transições da ZTA da amostra 3 B: a) transição do MB /ZTA e ZTA/cordão na zona 1, 2 e 3; b) transição Cordão/ZTA e ZTA/MB na zona 3,4 e 5. ....   | 56 |
| Figura 5.7- Cordão da amostra 3 B: a) em menor ampliação; b) em maior ampliação. ....   | 56 |
| Figura 5.8 – Microestrutura da amostra 6 B: a) MB na zona 1; b) Transição ZTA/Cordão na zona 2 e 3. ....  | 57 |
| Figura 5.9- Comparação entre o cordão da amostra 6 B e 3 B: a) cordão da amostra 6 B; b) cordão da amostra 3 B. ....  | 57 |
| Figura 5.10- Evolução da dureza ao longo da junta de soldadura, para diferentes temperaturas de pré-aquecimento (400 °C na amostra 3 B e a 250 °C na amostra 6 B). ....   | 58 |
| Figura 5.11- Microestrutura da amostra 7 B: a) MB; b) transição ZTA/Cordão .....  | 59 |
| Figura 5.12- Microestrutura da amostra 10 B: a) MB; b) transição ZTA/cordão .....   | 59 |
| Figura 5.13- Evolução da dureza na junta de soldadura com as diferentes temperaturas de pré-aquecimento, a 400 °C na amostra 7 B e a 250 °C na amostra 10 B. ....   | 60 |
| Figura 5.14- Aumento da fração volúmica do constituinte eutetóide na zona do cordão: a) Na amostra 7 B; b) Na amostra 10 B .....  | 60 |
| Figura 5.15- Microestrutura da amostra 4 B: a) MB na zona 1; b) transição ZTA/Cordão na zona 2 e 3. ....  | 63 |
| Figura 5.16- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes condições de arrefecimento, sendo a amostra 6 B arrefecida ao ar e a amostra 4 B no forno (a 250 °C com velocidade de arrefecimento de 0,5 °C/min. .... | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.17- Micrografia da amostra 9 B: a) porosidades na zona do cordão; b) microestrutura dendrítica no cordão .....  | 64 |
| Figura 5.18- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes condições de arrefecimento, sendo a amostra 3 B arrefecida ao ar e a amostra 9 B no forno (a 400 °C com velocidade de arrefecimento de 0,5 °C/min). .... | 64 |
| Figura 5.19– Microestrutura da amostra 8 B: a) transição MB/ZTA e ZTA/cordão; b) cordão... 65  |    |
| Figura 5.20- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes condições de arrefecimento, sendo a amostra 7 B arrefecida ao ar e a amostra 8 B no forno (a 400 °C com velocidade arrefecimento de 0,5 °C/min). ....    | 65 |
| Figura 5.21- Microestrutura da amostra 11 B: a) transição cordão/ZTA e ZTA/MB da amostra 11 B na zona 3,4 e 5; b) cordão .....   | 66 |
| Figura 5.22- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes condições de arrefecimento, sendo a amostra 10 B arrefecida ao ar e a amostra 11 B no forno (a 200 °C com velocidade arrefecimento de 0,5 °C/min). ....  | 66 |
| Figura 5.23- Microestrutura da amostra 3 A: a) MB; b) transição da ZTA para o cordão na zona 2 e 3 .....   | 68 |
| Figura 5.24 - Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidade de corrente, sendo a amostra 3 A soldada a 90 A e a 3 B a 110 A. ....   | 68 |
| Figura 5.25- Microestrutura da amostra 6 A na zona sem penetração.....   | 69 |
| Figura 5.26- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 6 A soldada a 90 A e a 6 B a 110 A. ....   | 70 |
| Figura 5.27- Microestrutura da amostra 4 A: a) MB na zona 1; b) transição ZTA/cordão na Zona 2 e 3. ....   | 71 |
| Figura 5.28- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 4 A soldada a 90 A e a 4 B a 110 A. ....   | 71 |
| Figura 5.29- Microestrutura da amostra 9 A: a) transição cordão/ZTA na zona 3 e 4; b) transição ZTA/MB na zona 4 e 5. ....   | 72 |
| Figura 5.30- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 9 A soldada a 90 A e a 9 B a 110 A. ....   | 72 |
| Figura 5.31- Microestrutura da amostra 8 A: a) MB na zona 5; b) transição cordão/ZTA na zona 3 e 4. ....   | 73 |
| Figura 5.32- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 8 A soldada a 90 A e a 8 B a 110 A. ....   | 73 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.33- Microestrutura da amostra 10 A e 11 A: a) porosidades e fissuração no cordão da amostra 10 A; b) porosidades e fissuração da amostra 11 A. .... | 74 |
| Figura 5.34- Microestrutura da amostra 10 A: a) MB; b) transição MB/ZTA e cordão/ZTA na zona sem penetração.....   | 75 |
| Figura 5.35- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 10 A soldada a 90 A e a 10 B a 110 A. ....   | 75 |
| Figura 5.36- Transição do MB/ZTA e ZTA/cordão na microestrutura da amostra 11 A. ....  | 76 |
| Figura 5.37- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 11 A soldada a 90 A e a 11 B a 110 A. ....   | 76 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1- Composição química dos bronzes segundo NP-861 .....   | 9  |
| Tabela 2.2- Composição química das fases presentes nas ligas de Cu-Sn.....  | 12 |
| Tabela 2.3- Constituintes abaixo do ponto de solidificação e após o arrefecimento até 400 °C para os diferentes teores de Sn..... | 12 |
| Tabela 2.4- Propriedades dos diferentes tipos de bronze. ....   | 17 |
| Tabela 2.5- Composição química e propriedades físicas das diferentes ligas de bronze.....   | 17 |
| Tabela 5.1- Valores referentes à moldação em areia de silicato de sódio/CO <sub>2</sub> . ....                                    | 49 |
| Tabela 5.2- Composição química do lingote e das varetas em peso (obtido por FRX).....   | 51 |
| Tabela 5.3 - Parâmetros de soldadura testados neste trabalho. ....  | 54 |
| Tabela 5.4- Parâmetros utilizados na verificação do efeito da temperatura de pré-aquecimento.....                                 | 55 |
| Tabela 5.5- Valores médios de dureza das amostras 3B e 6 B.....   | 58 |
| Tabela 5.6: Valores médios de dureza das amostras 7 B e 10 B. ....  | 60 |
| Tabela 5.7- Parâmetros utilizados na verificação do efeito da velocidade de arrefecimento. ....                                   | 62 |
| Tabela 5.8: Parâmetros utilizados na verificação do efeito da intensidade de corrente.....  | 67 |
| Tabela 5.9- Valores médios de durezas das amostras 3 A e 3 B. ....  | 69 |
| Tabela 5.10- Valores médios de dureza das amostras 6 A e 6 B.....   | 70 |
| Tabela 5.11- Valores médios de dureza das amostras 4 A e 4 B.....   | 71 |
| Tabela 5.12- Valores médios de dureza das amostras 8 A e 8 B.....   | 74 |
| Tabela 5.13- Valores médios de dureza das amostras 10 A e 11 B.....   | 75 |
| Tabela 5.14- Valores médios de dureza das amostras 10 A e 11 B.....   | 76 |



# 1. Introdução

Os sinos de igreja são instrumentos musicais, fortemente ligados à cultura Europeia. Como estruturas expostas a condições severas durante o badalar, estão sujeitas à fadiga e ao desgaste podendo fissurar ao longo do tempo.

Até tempos relativamente recentes, a única maneira de reparar um sino fissurado era através da sua re-fundição, não sendo a solução ideal devido ao valor histórico que muitos sinos têm. Desta forma, nasceu a necessidade do restauro de sinos por soldadura, no entanto um número muito reduzido de empresas o consegue fazer, devido ao facto da liga ser considerada inadequada para a soldadura, não existindo assim nenhuma norma ou procedimento.

Em Portugal não existe nenhuma empresa que efetue o restauro de sinos fissurados por soldadura, para tal, as empresas que atuam neste ramo, necessitam de importar este tipo de serviço, traduzindo-se num custo acrescentado. A empresa Jerónimos, Carlos & Luís Jerónimo Lda. atua em duas áreas distintas: sinos, órgãos e relógios de torre. Nestas áreas produzem, importam, projetam, instalam, aconselham e assistem em toda a gama de equipamentos. No património móvel associado aos sinos, realizam diagnósticos, projetos e a execução de conservações e restauros. O tema deste trabalho surge da necessidade desta empresa conseguir alcançar o conhecimento para o restauro de sinos fissurados por soldadura, valorizando deste modo a sua produção, na medida em que, para além de não ter custos adicionais na importação, ainda pode exportar o serviço, competindo com o mercado atual.

O bronze dos sinos é uma liga com aproximadamente 80 % de cobre (Cu) e 20 % de estanho (Sn), sendo normalmente na fundição, adicionado outros elementos de liga como o chumbo, o zinco e o fósforo. Esta liga tem um elevado intervalo de solidificação e tem a tendência a fragilizar quente, desta forma, no arrefecimento qualquer tensão provocada pela soldadura pode causar a fissuração, problema que é acentuado na presença de chumbo.

Neste trabalho, foi estudada a influência de alguns parâmetros de soldadura como a intensidade de corrente, a temperatura de pré-aquecimento, o material de adição e a velocidade de arrefecimento pós soldadura, numa liga de bronze usada na fundição de sinos, utilizando a técnica de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas).

Ainda neste capítulo será abordada a história, os modos de falha e o restauro de sinos. No capítulo 2 apresenta-se um estudo sobre as ligas de bronze, desde a sua microestrutura até às suas propriedades. No capítulo 3 são abordados conceitos da metalurgia da soldadura, e são apresentadas informações relativas à soldadura do cobre e suas ligas, especificando normas e procedimentos para bronzes

Após os ensaios de soldadura, foram preparadas várias amostras para caracterização mecânica e microestrutural. No capítulo 4 são apresentados os procedimentos experimentais utilizados tanto na fundição do material de adição como nos ensaios de soldadura e na obtenção das amostras. No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados dessa caracterização. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas e no capítulo 7 apresentam-se as considerações finais sobre trabalhos futuros.

## **1.1. História dos sinos**

Embora seja difícil apontar exatamente quando surgiu o primeiro sino, sabe-se que são dos instrumentos musicais mais antigos feitos pelo homem. Há representações de sinos em tábuas de pedra que datam do século 4 A.C. Na China, foram descobertos sinos do século 5 A.C. [29].

Os sinos estão espalhados em várias partes do mundo. Há diferenças evidentes entre a cultura do Oriente e do Ocidente no que diz respeito aos sinos. No oriente a sua vertente sempre foi mais musical, tornando-se populares entre os budistas, e um instrumento diversificado feito de vários metais, com diferentes formas [3]. Na Europa surgiram em igrejas, mosteiros e conventos e para além do aspeto musical, serviam para alertar e convidar os fiéis para celebrações e para orações diárias. Também exerciam funções sociais importantes para as comunidades, e de acordo com o seu toque, conhecido em antemão pelo povo, os sinos alertavam para incêndios, vendavais e outros tipo de perigos ou também para a morte e o sepultamento de pessoas da comunidade ou mesmo para o nascimento de uma criança, alguns atos que ainda nos dias de hoje acontecem.

Durante séculos, o processo básico de fabricar sinos não mudou. Até mesmo nos dias de hoje, o processo é fiel aos métodos transmitidos através de gerações. A afinação do sino pode

ser a parte crucial do processo. Cada sino tem um diferente tom dependendo do seu tamanho, um sino grande tem um tom grave enquanto um pequeno tem um tom agudo. Durante muitos séculos para obter o tom correto, o fundidor, esculpia dentro ou fora do sino. Se soa-se muito grave, o tom podia ser elevado removendo metal da borda inferior do sino, se fosse muito agudo, podia baixar o tom, pela remoção de metal da parte de dentro do sino. Os sinos europeus são agora afinados por um torno mecânico.

Os sinos têm uma história longa e diversificada em todo o mundo, e muitos acabaram como parte de exposições em museus e coleções de valor inestimável, exemplo disso é o sino da liberdade, conhecido mundialmente, sendo um ícone dos E.U.A.

## 1.2. Modos de falha

Os sinos são estruturas sujeitas à fadiga estrutural e podem danificar-se, particularmente, quando fabricados com pouca precisão na fundição (existência de impurezas e bolhas de ar). As condições de funcionamento do sistema de suporte sino-badalo diferem de região para região, e esses mecanismos são a razão frequente de dano e da fratura. As partes que constituem um sino encontram-se ilustradas na Figura 1.1.

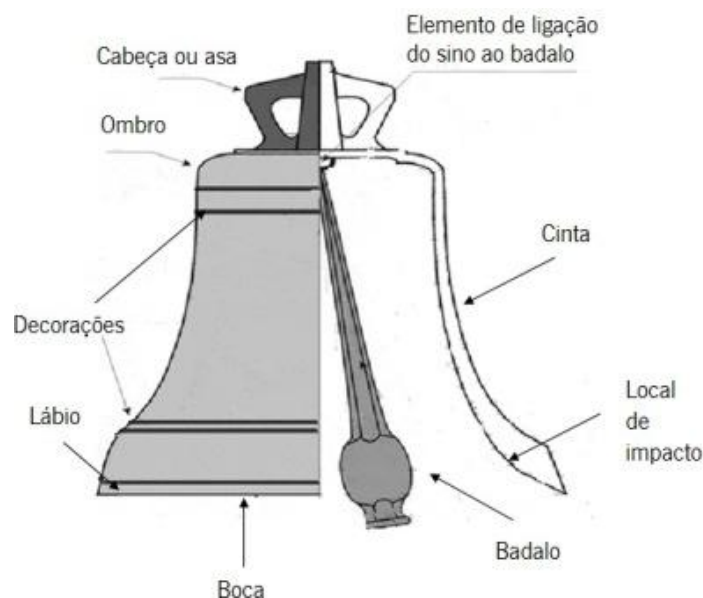


Figura 1.1- Partes constituintes de um sino [adaptado de 16].

Resumidamente os sinos podem fissurar devido a [5,16,31,35]:

- i. À corrosão e expansão do ferro fundido (do elemento ligador do sino ao badalo), que se encontra na cabeça do sino, provocando tensões nessa região. Este tipo de ligações deve ser evitado;
- ii. No toque do sino. Deve-se optar por aplicar “triggers”, para impacto estacionário, prevenindo o contato do martelo com o sino enquanto este estiver a soar. Também o desgaste do rolamento pode influenciar, e provocar um movimento extra no badalo, aumentando a taxa de desgaste;
- iii. Indentações provocadas pelo badalo. O uso prolongado resulta no desgaste do local de impacto. Quando uma indentação atinge a profundidade de 15 % de espessura inicial, o sino deve ser rodado um quarto da posição inicial para apresentar uma nova face para o impacto do badalo [35].
- iv. Colisões entre o balançar do sino e os martelos elétricos ou os martelos normais (mecânicos, puxados manualmente).

Os dois principais locais, onde se originam as fissuras, são na cabeça do sino e no local de impacto do badalo. Até 1850 a peça em ferro forjado que suportava o badalo era fixada no molde antes do bronze ser fundido [31]. O ferro forjado oxida e expande-se, provocando tensões no bronze resultando assim no desenvolvimento de uma fissura. Desta forma a falha expande-se até à boca do sino. Assim as ligações antigas dos badalos devem ser retiradas nas cabeças dos sinos para prevenir o anteriormente descrito, e usar outro tipo de suporte, uma ligação de parafusos pode resolver o problema.

Uma falha direta no local de impacto do badalo também é usual. O sino ao ser tocado, a zona de impacto vai vibrar, e se essa parte for restringida de alguma forma, irá provocar uma falha mais tarde ou mais cedo devido à fragilidade do material. Por exemplo, um martelo elétrico que no final da pancada ainda mantenha a posição após o impacto, ou um sacristão que puxe o badalo e não o largue de uma vez, são potenciais causas para a falha de um sino.

De forma a perceber melhor o dano causado quando os sinos são tocados, nos últimos anos, foram realizados vários projetos sobre a vida dos sinos. Em nome do *Verein Deutscher Gießereifachleute* (VDG) - federação especialista em fundição, pesquisadores do instituto *Fraunhofer* de durabilidade estrutural (LBF) em Darmstadt, estudaram experimentalmente e

numericamente o dano causado quando os sinos são tocados. Chegou-se à conclusão que a forma e o peso do badalo não têm importância no dano causado e que ao contrário das expectativas, a temperatura ambiente não tem grande significado. O maior risco para os sinos é o excesso de entusiasmo no toque do sino, assim no balanço quanto maior o ângulo maior a velocidade e força aplicada. Basta aumentar apenas 1 grau no ângulo de impacto para reduzir a vida em 14 % do sino [6, 30].

Em outro estudo realizado por *Meneghetti e Rossi* [27], chegou-se também à conclusão que as propriedades físicas do badalo (forma e o peso) não influenciam o impacto sendo a angularidade a principal responsável pelo aumento das falhas.

Quanto ao desgaste, este é explicado pela deformação elásto-plástica provocada pelo impacto do badalo no sino, que leva também a alterações microestruturais, e consequentemente ao desgaste (DIN 50320). O desgaste e encruamento da superfície do sino conduzem à iniciação e propagação da fratura. Adicionalmente partículas dos materiais (do badalo e do sino) podem aderir à superfície interior do sino e quebrar devido à formação de microsoldaduras de contato.

### **1.2.1. Restauro de sinos por soldadura**

Poucas são as empresas que fazem o restauro de sinos por soldadura. A empresa SoundWeld é uma delas [34].

Em 1967 o *Welding institute* iniciou um programa de investigação sobre a soldadura de sinos fissurados. Com as instalações e o conhecimento técnico (know how), disponível em Abington, conseguiriam encontrar algumas respostas para a soldadura de sinos [34].

Já os holandeses [34] tinham conseguido reparar sinos por soldadura com a soldadura por arco elétrico com eletrodo revestido (MMA), mas a taxa de sucesso não era suficiente. Na altura pensou-se que com aperfeiçoamento da Soldadura Oxiacetilénica poder-se-ia obter uma melhor qualidade na soldadura. No entanto, depois de testados e examinados uma variedade de processos, chegou-se à conclusão que o processo TIG com um metal de adição especial apresentava melhores resultados.

Em 1968 a *Soundweld* adotou o processo TIG e ainda continua a ser usado até á data. Atualmente a soldadura progrediu a tal nível que em qualquer parte do sino a fissura pode ser reparada com uma garantia de 5 anos. A longevidade do restauro foi uma melhoria importante porque era bastante comum os sinos fissurarem novamente após a sua reparação. Na Figura 1.2 encontram-se exemplos de sinos restaurados por soldadura, onde se visualiza as fissuras na cabeça dos sinos.



Figura 1.2- Exemplos de restauro de sinos por soldadura [34].

Em seguida são apresentados alguns parâmetros indicativos do procedimento de restauro fornecidos pela empresa *Soundweld* [34]:

- i. O tempo médio da reparação de um sino fissurado é de 42 horas;
- ii. O tempo médio gasto na soldadura de um sino fissurado é de 4 horas;
- iii. Todo o tipo de sinos já foram soldados, desde os sinos pequenos até aos de maior diâmetro;
- iv. Todas as partes constituintes dos sinos já foram soldadas incluindo a zona de suporte do sino (asa ou cabeça) e as indentações do badalo;
- v. São realizados pelo menos 4 testes de líquidos penetrantes no sino para determinar a extensão da fissura;
- vi. Em média o sino requer 24h de aquecimento para atingir a temperatura correta para a soldadura e mais 36 horas para baixar para a temperatura ambiente;
- vii. 80 % do material de isolamento ( para a diminuição da velocidade de arrefecimento) usado no sino é reciclado e usado novamente;

- viii. Mais de 500 sinos foram soldados pela *Soundweld*;
- ix. Foram soldados sinos provenientes de Inglaterra, Escócia, Irlanda e País de Gales como também de França, Suécia e Malta.

Além da técnica TIG, sabe-se também que o restauro de sinos por soldadura pode, também, ser efetuado por soldadura a laser. Um exemplo disso, é um estudo efetuado num sino com 2300 anos de idade, em que, foi possível o seu restauro através da soldadura a laser, obtendo-se bons resultados mesmo a nível acústico [23].

### 1.3. Objetivos

O objetivo deste estudo é determinar o efeito dos parâmetros de soldadura sobre as características da junta soldada e a qualidade final do restauro de sinos. Para tal, serão testados, numa liga de bronze destinada à fundição de sinos, os seguintes parâmetros de soldadura:

- i. A da intensidade de corrente, utilizando 90 e 110 Amperes (A).
- ii. O pré-aquecimento, utilizando duas temperaturas, 250 °C e 400 °C.
- iii. A velocidade de arrefecimento, sendo o arrefecimento pós soldadura ao ar e no forno (a partir de duas temperaturas de pré-aquecimento diferentes, 250°C e 400°C).
- iv. O material de adição, utilizando a composição química do metal base, e o material base com adição de 5 % de Sn.

A partir da análise das juntas de soldadura obtidas pretende-se identificar a influência dos diferentes parâmetros de processo estudados sobre as alterações na microestrutura final. O efeito das condições de soldadura sobre o comportamento mecânico da junta soldada foi feito por recurso a microdurezas.





## 2. Ligas de bronze

Os bronzes são ligas de cobre (Cu) e estanho (Sn), sendo a liga mais antiga conhecida pelo homem (cerca de 3 000 AC) [15], que ainda faz parte dos materiais de engenharia mais utilizados na indústria. Para perceber esta liga, no decorrer deste capítulo, é importante conhecer as propriedades físicas do cobre (segundo a norma portuguesa NP 371 [38]):

- i. Massa atómica: 63,57
- ii. Massa volúmica: 8,886 kg/dm<sup>3</sup>
- iii. Estrutura cristalina: CFC
- iv. Temperatura de recristalização: 230 °C
- v. Ponto de fusão: 1083 °C
- vi. Ponto de ebulição: 2360 °C
- vii. Coeficiente de dilatação linear:  $17 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- viii. Condutividade elétrica (20°C): 60 m.Ω<sup>(1)</sup>. mm<sup>2</sup>
- ix. Condutividade térmica 0,94 cal.cm<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>

Quanto às características físicas do estanho, a mais relevante para as ligas de bronze é o seu baixo ponto de fusão, 231,9 °C, que faz com que a temperatura de fusão das ligas também seja inferior à temperatura de fusão do cobre.

Neste trabalho todas as percentagens dos elementos químicos são em peso. Segundo a norma portuguesa NP-861, os bronzes são divididos segundo a composição química da seguinte forma (Tabela 2.1)

Tabela 2.1- Composição química dos bronzes segundo NP-861 [adaptado de 33]

| Tipo     | Cobre (%) | Estanho (%) | Chumbo (%) |
|----------|-----------|-------------|------------|
| Cu-Sn X  | 80 a 98   | 2 a 20      | Pb< 0,5    |
| Cu-Sn 20 | 80        | ~20         |            |
| Cu-Sn 40 | ~ 60      | ~ 40        |            |

Além dos componentes principais, estas ligas podem conter outros elementos cuja influência se passa a descrever [33]:

- i. Alumínio: a sua presença é indesejável pois, teores de 0,005 % pode já favorecer o aparecimento de porosidades devido à contração ou à retenção de gases na película de alumina;
- ii. Bismuto: causa fragilidade devido à formação duma película intergranular para teores superiores a 0,0004 %; prejudica a laminagem;
- iii. Antimónio: forma com o cobre diversas fases intermédias que provocam o aumento da dureza e da fragilidade. O seu teor está limitado a 0,3 %. Só se usa em casos especiais;
- iv. Chumbo: o cobre e o chumbo não são miscíveis no estado líquido para teores de chumbo de 36 a 92,5 %, dando origem, devido à diferença de densidades, a heterogeneidades difíceis de evitar. Por este motivo o teor de chumbo nos bronzes com chumbo está limitado a 30 %. Todavia, a presença de pequenos teores de níquel (cerca de 1 %) tende a uniformizar a distribuição dos globos de chumbo na matriz. Mesmo em teores baixos (0,0004%) prejudica a laminagem. Em teores baixos (<4 %), e embora seja praticamente insolúvel no bronze alfa, o chumbo facilita o vazamento e sobretudo melhora a sanidade de peça (ausência de porosidade), e portanto, a estanquidade das peças vazadas; em percentagem superior a 2 % prejudica a resistência mecânica. Facilita a maquinagem e melhora o comportamento em serviço relativamente ao atrito para os teores de 8 a 30 % (bronzes com chumbo);
- v. Enxofre: prejudica a sanidade das peças em teores superiores a 0,3 %;
- vi. Ferro: endurece e torna os bronzes frágeis para teores superiores a 0,2 %. No caso de fios para enrolamento é de evitar porque tende a torná-los magnéticos;
- vii. Fósforo: entra na composição de bronzes bifásicos cujos constituintes são a solução sólida alfa e o eutetóide. Aumenta a dureza das ligas visto que, reduzindo a solubilidade do estanho na solução sólida alfa, aumenta a quantidade de eutetóide. Para teores de 0,3 % P e 10 % Sn forma-se o constituinte  $\text{Cu}_3\text{P}$ , duro, que vem em geral associado à fase alfa;
- viii. Zinco: diminui a dureza da solução sólida alfa, que é útil para a cunhagem de moedas e medalhas. Diminui o comportamento em serviço em relativamente ao

atrito e para teores superiores a 2 % diminui a resistência mecânica das ligas. Melhora a vazabilidade porque diminui a temperatura de fusão das ligas.

Existem outras ligas de cobre e estanho<sup>1</sup>, como o bronze com fosforo (bronzes fosforosos), bronze com chumbo, bronze de alumínio, bronze com zinco, e bronze com chumbo e zinco. No entanto para este estudo apenas são relevantes as ligas Cu-Sn.

## 2.1. Microestrutura do bronze

O diagrama de equilíbrio do bronze varia de autor para autor, tendo neste trabalho sido utilizado o diagrama proposto pela ASM (*American Society for Metals*) [6], apresentado na Figura 2.1. Este diagrama é complexo, constituído por cinco pontos peritéticos, um ponto eutético, e quatro pontos eutetóides. A adição de estanho no cobre resulta na formação de uma série de soluções solidas, representadas na Tabela 2.2, das quais apenas se vão referir as transformação que têm interesse na interpretação das ligas industriais, isto é, até o teor de cerca de 40 % de estanho.

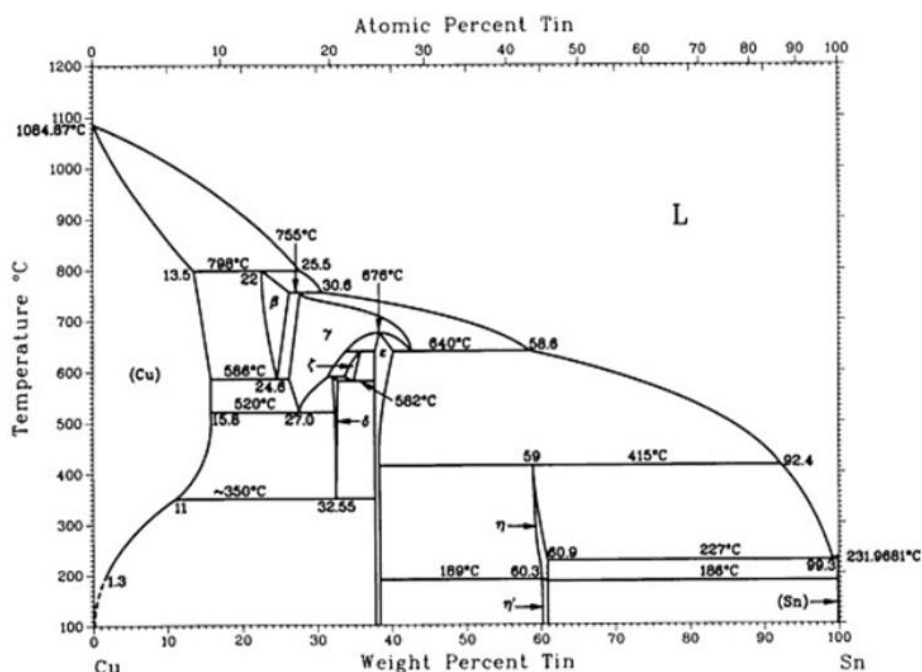


Figura 2.1- Diagrama de equilíbrio da liga Cu-Sn [6].

<sup>1</sup> Neste estudo estas ligas são abordadas superficialmente, para maior aprofundamento deve-se consultar a seguinte bibliografia: [6, 8, 9, 15, 36].

Tabela 2.2- Composição química das fases presentes nas ligas de Cu-Sn. [adaptado de 6]

| Fase             | $\alpha$ | $\beta$     | $\gamma$    | $\delta$ | $\zeta$     | $\epsilon$  | $\eta$      | $\eta'$     | ( $\beta$ Sn) | ( $\alpha$ Sn) |
|------------------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|----------------|
| Teor de Sn (%Sn) | 0 - 15.8 | 22.0 - 27.0 | 25.5 - 41.5 | 32 - 33  | 32.2 - 35.2 | 27.7 - 39.5 | 59.0 - 60.9 | 44.8 - 60.9 | ~100          | 100            |

Nos bronzes, no início da solidificação forma-se a solução sólida  $\alpha$  (alfa), de estrutura cristalina cúbica de faces centradas. A solubilidade do estanho aumenta até 15,8 % Sn à temperatura de 520 °C para se reduzir progressivamente até 1% à temperatura ambiente. Para ligas entre 13, 5 % e 25, 5 % de Sn dá-se uma reação peritética de que resulta no aparecimento da fase  $\beta$ , a solução sólida cristalina cúbica de corpo centrado. Assim, neste intervalo as ligas podem ser bifásicas,  $\alpha + \beta$ , ou monofásicas,  $\beta$ . Por arrefecimento, a fase  $\beta$  transforma-se em  $\alpha + \gamma$ , a 586 °C e esta, por sua vez, sofre a 520 °C a transformação eutetóide (27 % Sn), em que  $\gamma \rightarrow \alpha + \delta$ . O constituinte  $\gamma$  transforma-se em  $\alpha$  e  $\delta$ , e finalmente  $\delta$  transforma-se em  $\alpha + \epsilon$ , a 350°C.

Contudo, como o equilíbrio é difícil de alcançar nestas ligas, a estrutura  $\alpha + \epsilon$  só se obtém depois de prolongado tratamento térmico a baixa temperatura, nas ligas até 15 %. As ligas vazadas estão fora do equilíbrio e têm uma estrutura  $\alpha +$  eutetóide ( $\alpha + \delta$ ) [13,15,33].

Na Tabela 2.3 apresenta-se o resumo dos constituintes presentes abaixo da temperatura de solidus e após o arrefecimento até 400 °C, para diferentes teores de estanho. No arrefecimento, a partir de 400 °C até à temperatura ambiente, as alterações da microestrutura são tão lentas que apenas ocorrem em condições muito distantes da prática [4,28].

Tabela 2.3- Constituintes abaixo do ponto de solidificação e após o arrefecimento até 400 °C para os diferentes teores de Sn

| Composição química (%) |       | Constituintes abaixo da temperatura solidus | Constituintes após o arrefecimento até 400 °C |
|------------------------|-------|---|---|
| Cu                     | Sn    |   |   |
| 100-87                 | 0-13  | $\alpha$                                    | $\alpha$                                      |
| 87-86                  | 13-14 | $\alpha + \beta$                            | $\alpha$                                      |
| 86-78                  | 14-22 | $\alpha + \beta$                            | $\alpha + \delta$                             |
| 78-74                  | 22-26 | $\beta \rightarrow (\alpha + \beta)$        | $\alpha + \delta$                             |

A fase  $\alpha$ , com estrutura cristalina CFC, é a mais macia de todos os constituintes do sistema Cu-Sn. A fase intermédia  $\gamma$  (gama) possui de estrutura cristalina cúbica de faces centradas. A fase  $\delta$  (delta) costuma ser associada à estequiometria de  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ , possui cor azul pálida, e é muito dura e frágil. À fase  $\epsilon$  (épsilon) atribui-se a estequiometria  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  [32,33].

Os bronzes industriais em que  $\text{Sn} < 20\%$  (com exceção dos destinados ao fabrico de sinos), são constituídos à temperatura ambiente ou apenas pela fase  $\alpha$ , ou pelas fases  $\alpha +$  eutetoide. Estes bronzes podem ser temperados havendo, neste caso, a manutenção da fase  $\beta$  à temperatura ambiente, resultando numa estrutura martensítica, dura mas menos frágil do que o mesmo bronze arrefecido lentamente. Se as condições de têmpera não forem suficientes para reter a fase  $\beta$  do bronze pode-se desenvolver a estrutura de *widmanstätten* de fase alfa  $\alpha$  e  $\delta$ .

Entre 17 % e 19 % de Sn, sabe-se que a liga não pode ser trabalhada nem a quente nem a frio, devido à formação de um filme da fase delta, que reveste a fronteira de grão que promove fissuração da liga [32].

Por outro lado, o largo intervalo de solidificação dá lugar a zonamento pronunciado e a difusão é tao lenta que o constituinte  $\delta$  chega a aparecer em fundições com 7 % Sn. Deste facto resulta que ligas com maior percentagem de estanho só dificilmente são laminadas, a não ser após recozimento prolongado para homogeneizar a solução solida. Assim, as ligas de alto teor em estanho são deformáveis a quente (fases  $\alpha + \beta$ ) ou deformáveis a frio após recozimento e têmpera.

Sem as alterações introduzidas com a adição de outros elementos de liga, como o zinco, as características estruturais, vistas em quase todos os bronzes de baixo teor em estanho são:

- i. Bronzes homogéneos, em que todo o estanho está dissolvido no cobre e que não aparece zonamento.
- ii. Bronzes, em que existe uma distribuição não uniforme do cobre e do estanho, mas não existe o constituinte eutetóide.
- iii. Bronzes em que existe o constituinte eutetóide e a fase alfa.
- iv. Bronzes em que existe a fase alfa extensivamente zonada e no qual o constituinte eutetóide está presente.

As microestruturas predominantemente constituídas pela fase  $\alpha$  são de tipo dendrítico<sup>2</sup>, que, crescem aleatoriamente no metal até se encontrarem umas com as outras. No bronze, existe uma tendência para a formação de zonamento nas dendrites devido ao elevado intervalo de solidificação (o cobre funde-se a 1083 °C e o estanho a 232 °C). Assim quando começa a solidificar, pela segregação dendrítica, os braços primários das dendrites são mais ricos em cobre solidificando em primeiro lugar, enquanto as partes exteriores, mais ricas em estanho, começam a solidificar mais tarde, resultando num gradiente na composição do braço desde a zona interior até á superfície exterior.

A estrutura do constituinte eutetóide é normalmente formada pelas extremidades das dendrites e por pequenas ilhas da fase  $\delta$ . Na Figura 2.2 pode-se observar um esquema da morfologia das fases  $\alpha$  e  $\delta$  de uma liga Cu-Sn.

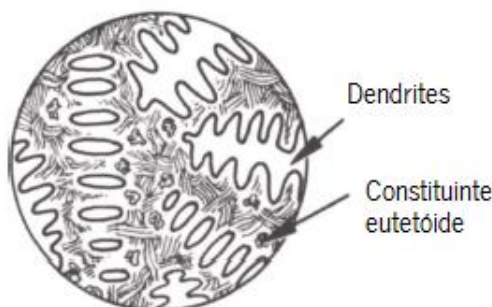


Figura 2.2- Constituintes  $\alpha$  e  $\delta$  de uma liga Cu-Sn [32]

Na fundição o fator de controlo principal para as propriedades da liga é o tamanho das dendrites de fase  $\alpha$  primária e a distribuição da fase  $\delta$  na microestrutura da liga. Este tamanho das dendrites pode ser reduzido através do aumento da taxa de nucleação na fase líquida, tanto por inoculação como pelo controlo adequado da taxa de arrefecimento. Quanto mais rápido o arrefecimento, mais finas serão as dendrites de fase  $\alpha$  [11 citado por Brooks (1988)].

## 2.2 Tratamentos térmicos

O recozimento é largamente utilizado para homogeneizar os produtos fundidos e para o amaciamento de produtos endurecidos por deformação a frio.

---

<sup>2</sup> É um fenómeno da segregação que acontece em metais impuros ou em ligas, como o cobre, em que um dos constituintes contém um ponto de fusão mais baixo que o outro.

A têmpera efetua-se nos bronzes com mais de 13 % Sn para evitar a precipitação da fase delta. É uma têmpera martensítica em que as fases são  $\alpha$  ou  $\alpha + \beta$  consoante o teor de estanho. Igualmente pode-se evitar, por têmpera, a estrutura  $\alpha +$  eutetóide, retendo a fase  $\beta$  à temperatura ambiente, do que resulta melhor resistência e facilidade de deformação devido ao facto de, ao contrário do que sucede nos aços, o material ficar mais macio após têmpera. No entanto este tratamento não é em geral aconselhável visto que há outras ligas, de custo inferior aos bronzes, com propriedades equivalentes obtidas por este tratamento. Por este motivo, estas ligas com teores > 7 % Sn são usadas apenas em fundição.

### 2.3. Propriedades

Os bronzes podem ser divididos em dois tipos: os bronzes de baixo teor em estanho e os bronzes de alto teor em estanho. Esta divisão está associada à solubilidade do estanho na solução rica em cobre ( $\alpha$ ). Assim as propriedades mecânicas melhoram até ao teor de 13 % Sn, mas a partir deste valor as ligas tornam-se cada vez mais frágeis e duras devido à precipitação da fase  $\delta$ , como se pode verificar pela Figura 2.3.

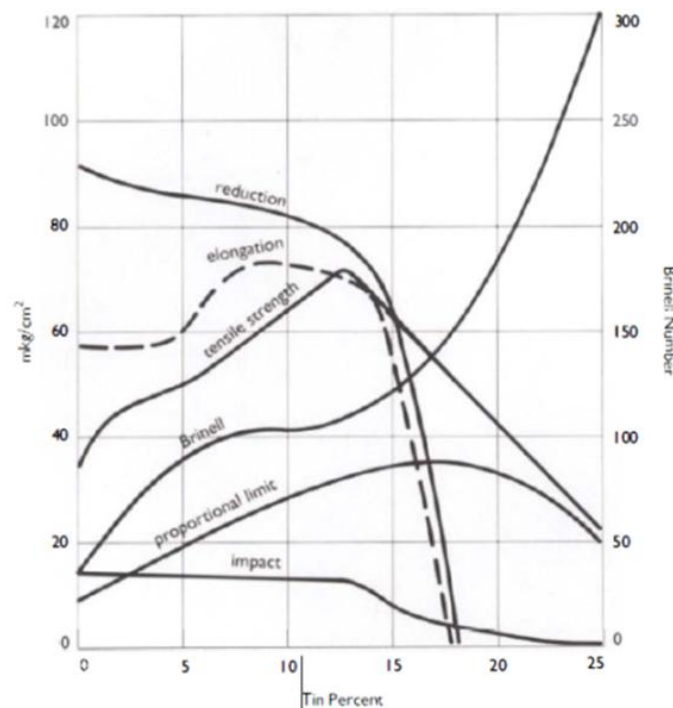


Figura 2.3- Variação das propriedades mecânicas das ligas de bronze [32]

Outra forma de dividir os bronzes é pela sua microestrutura, sendo dividida nos seguintes tipos:

- i. Bronzes alfa: São maleáveis a frio e a quente, enquanto os outros bronzes só podem ser trabalhados a quente acima de 600 °C para se obterem as soluções sólidas alfa e beta; por deformação a frio podem adquirir características mecânicas interessantes. No entanto, o teor de estanho deve ser tanto mais baixo quanto maior for o grau de deformação. Por isso, o teor de Sn está limitado a 4 % na fabricação de tubos; a 7 % nas ligas destinadas à fabricação de fios, embora para o fabrico de chapas por laminagem possa atingir 10 %. Uma dessas propriedades mais interessantes dos bronzes alfa, que é aproveitada no fabrico de molas, é o fato de após endurecimento a frio apresentar elevado limite de elasticidade. De modo geral, estas ligas têm boa resistência ao desgaste e muito boa soldabilidade.
- ii. Bronzes alfa + delta: Estas ligas têm bom comportamento em serviço relativamente ao atrito, visto que apresentam grãos duros numa matriz muito plástica ( $\alpha$ ). Dado o elevado intervalo de solidificação, as peças vazadas em bronze são mais sãs do que no caso dos latões devido a menores retrações. Em contrapartida a heterogeneidade é maior, trabalham-se menos facilmente e são mais caras.

Em geral os bronzes têm boa resistência à corrosão pela água e aos agentes atmosféricos. Na Tabela 2.4 apresentam-se alguns tipos de bronzes segundo as normas portuguesas NP 1206, e 1210 [39, 40].



Tabela 2.4- Propriedades dos diferentes tipos de bronze [39, 40].

| Tipo                 | Composição (%) |    |    |    |          | Características Mecânicas                          |   |                 |             |
|----------------------|----------------|----|----|----|----------|--|---|-----------------|-------------|
|                      | Cu             | Sn | Pb | Zn | P<br>máx | Limite de<br>elasticidade<br>(N.mm <sup>-2</sup> ) | Tensão<br>de<br>rotura<br>(N.mm <sup>-2</sup> ) | Alongamento (%) | Dureza (HB) |
| F-Cu-Sn 20           | 80             | 20 |    |    | 0,4      | 140  | 150   | 0               | 170         |
| F-Cu-Sn 10           | 90             | 10 |    |    | 1,0      | 120  | 240   | 12              | 70          |
|                      | 90             | 10 |    |    | 1,0      | 150  | 310   | 15              | 90          |
| F-Cu-Sn 10 Pb 10     | 80             | 10 | 10 |    | 0,10     | 80   | 180   | 7               | 65          |
|                      | 80             | 10 | 10 |    | 0,10     | 160  | 280   | 9               | 80          |
| F-Cu-Sn 10 Zn 2      | 88             | 10 |    | 2  | 0,10     | 120  | 240   | 12              | 65          |
| F-Cu- Sn 5 Pb 5 Zn 5 | 85             | 5  | 5  | 5  |          | 80   | 200   | 12              | 60          |
|                      | 85             | 5  | 5  | 5  |          | 90   | 250   | 12              | 65          |
| F-Cu-Sn-p            | 88             | 12 |    |    | 0.3      | 154  | 263   | 5               | 100         |
|                      | 94             | 6  |    |    | 0,20     |  | 849   | 5               |             |

Segundo a UNS (*Unified Numbering System*) a divisão dos bronzes efetua-se segundo o tipo de fabrico. Os bronzes trabalhados, conhecidos como os bronzes fosforosos que correspondem ao intervalo de ligas C50100-C52400 e os bronzes fundidos que correspondem ao intervalo de C90200-C91700. Na Tabela 2.5 apresentam-se as propriedades físicas dos bronzes fundidos (C90200-C91700). No Anexo 1 apresentam-se tabelas com estas e outras ligas, com mais informação acerca do tipo de fundição, propriedades físicas e mecânicas, composição química e aplicações.

Tabela 2.5- Composição química e propriedades físicas das diferentes ligas de bronze.

| Designação UNS | Composição Química (%) |             |      |           |      |         |      |      | Propriedades Físicas |  |
|----------------|------------------------|-------------|------|-----------|------|---------|------|------|----------------------|--|
|                | Cu                     | Sn          | Pb   | Zn        | Fe   | Ni      | Sb   | P    | Ponto<br>de<br>fusão | Cond.<br>térmica<br>(W/m ·<br>°K at 20<br>C) |
| C90500         | 86.00-89.99            | 9.00-11.00  | 0.30 | 1.00-3.00 | 0.20 | 1.00    | 0.20 | 1.5  | 999                  | 74.8   |
| C90700         | 88.00-90.00            | 10.00-12.00 | 0.50 | 0.50      | 0.15 | 0.50    | 0.20 | 1.5  | 999                  | 70.6   |
| C90800         | 85.00-89.00            | 11.00-13.00 | 0.25 | 0.25      | 0.15 | 0.50    | 0.20 | 0.3  | 999                  | 70.6   |
| C91000         | 84.00-86.00            | 14.00-16.00 | 0.20 | 1.50      | 0.10 | 0.80    | 0.20 | 1.5  | 960                  |  |
| C91100         | 82.00-85.00            | 15.00-17.00 | 0.25 | 0.25      | 0.25 | 0.50    | 0.20 | 1.0  | 950                  |  |
| C91300         | 79.00-82.00            | 18.00-20.00 | 0.25 | 0.25      | 0.25 | 0.50    | 0.20 | 1.5  | 889                  |  |
| C91600         | 86.00-89.00            | 9.7-10.8    | 0.25 | 0.25      | 0.20 | 1.2-2.0 | 0.20 | 0.30 | 1031                 | 70.6   |
| C91700         | 84.00-87.00            | 11.3-12.5   | 0.25 | 0.25      | 0.20 | 1.2-2.0 | 0.20 | 0.30 | 1015                 | 70.6   |

## 2.4. Bell Metal

Os bronzes utilizados no fabrico de sinos, conhecidos como *bell metal*, são ligas com estanho entre 20 a 30 %, podendo conter pequenos teores de zinco e de chumbo, sendo as ligas comerciais mais aproximadas a F-Cu-Sn 20 da norma portuguesa e a C91300 da norma UNS referidas nas tabelas em cima, entre outras de outras normas (ex. DIN, BS etc..). Este tipo de ligas é também usado para peças sujeitas a cargas muito elevadas, com apoios, gruas e segmentos de motores. A sonoridade dos sinos parece ser devida à fase  $\delta$  ( $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ) [33].

Num estudo realizado sobre a durabilidade dos sinos de igreja [30], um sino com a composição química 78.4 % Cu, 20.6% Sn, 0.11% Ni e 0.22% Si, apresentou as seguintes propriedades:

- i. Peso específico =  $8.4 \text{ kg/dm}^3$
- ii. Módulo de Young =  $98600 \pm 720 \text{ MPa}$
- iii. Tensão de rotura =  $126 \pm 18 \text{ MPa}$ .

O peso específico e o módulo de Young correspondem aos dados bibliográficos existentes ao contrário da tensão de rutura que é definitivamente inferior. A alta dispersão dos valores do módulo de Young e baixa resistência podem dever-se ao arrefecimento específico usado depois da fundição do sino e à sua porosidade específica. No ensaio de macrodureza a dureza obtida foi  $179 \pm 18 \text{ HB}$  correspondendo à informação bibliográfica. Nos ensaios de microdurezas *Vickers* o valor médio de dureza da fase  $\alpha$  foi  $107 \pm 3.6 \text{ HV } 0,3$  e da fase interdendrítica  $\alpha+\delta$  (eutetóide) foi obtido uma média de dureza de  $321 \pm 46 \text{ HV } 0,3$ .

## 2.5. Fundição

As ligas de cobre podem ser classificadas, relativamente à fundição, em três grupos distintos de acordo com o intervalo de solidificação. Esses grupos são os seguintes:

- i. Grupo I: Ligas que têm um estreito intervalo de solidificação, ou seja,  $50^\circ\text{C}$  entre a linha líquido e a linha sólido.
- ii. Grupo II: Ligas cujo intervalo de solidificação é intermédio, que varia entre  $50^\circ\text{C}$  e  $110^\circ\text{C}$ .

- iii. Grupo III: Ligas que têm um elevado intervalo de solidificação. Este vai de 110 °C até 170 °C.

Os bronzes estão inseridos no grupo III e devido ao estado pastoso em que se encontram durante a solidificação, apresentam menores problemas de alimentação que as ligas inseridas nos outros dois grupos. Com a utilização de secções de pequena espessura, consegue-se obter melhores resultados. A temperatura de vazamento dos bronzes depende da liga e do volume da peça. Por exemplo, para a liga comercializada para o fabrico de sinos (C91300, segundo a designação UNS), a temperatura de vazamento varia entre 1040 °C e 1095 °C para peças de pequena dimensão e entre 980 °C a 1040 °C para peças de maior volume [7]. A fusão deve ser rápida e efetuada num ambiente que não promova oxidação. Pode ser adicionado fósforo de modo a remover o oxigénio, contudo deve permanecer algum em solução para melhorar a fluidez. Teores residuais de fosforo superiores a 0,010-0,020 %, podem provocar porosidades. Deve-se também adicionar zinco de modo a compensar a perda que possa existir por vaporização.

Para a escolha de um processo de fundição é fundamental determinar o tamanho e a forma das peças a serem fundidas, a quantidade de peças a serem produzidas, os requisitos de projeto, as tolerâncias dimensionais e a qualidade desejada. A seleção dos processos de fundição recomendados para ligas de cobre é de acordo com o grau de vazabilidade (alto ou baixo). Para o bronze, os processos que apresentam alta vazabilidade são a fundição em areia, a contínua e em moldação permanente.



### 3. Fundamentos da soldadura

Existem numerosas definições de soldadura, sendo as mais indicadas as que transmitem a noção de continuidade, tal como se encontra, por exemplo, na norma ISO R85 [41]. Assim, a soldadura pode ser definida como um “processo de ligação permanente entre duas peças através da união íntima e atômica entre superfícies em contacto obtendo-se uma junta com propriedades mecânicas análogas ou superiores às do metal base e mantendo-se a continuidade de natureza metálica através da ligação” [1]. A soldadura ideal seria aquela em que, a continuidade entre os elementos a ligar fosse impossível de distinguir. No entanto na prática isso é quase impossível de alcançar. De maneira a obter-se juntas de soldadura isentas de defeitos e com boas propriedades mecânicas, os processos de soldadura devem preencher um determinado número de requisitos [1]:

- i. Fornecer energia para facilitar a união;
- ii. Possuir mecanismo de remoção das substâncias contaminadoras superficiais;
- iii. Evitar contaminação do cordão pela atmosfera;
- iv. Permitir o controlo da estrutura do metal depositado.

Hoje em dia, existem diversos processos de soldadura para os diferentes metais, tipos de juntas e aplicações. A AWS (American Welding Society) elaborou um gráfico resumo classificando todos os processos de soldadura e processos aliados. Na Figura 3.1 encontra-se uma adaptação desse gráfico relativo só à classificação dos processos de soldadura.

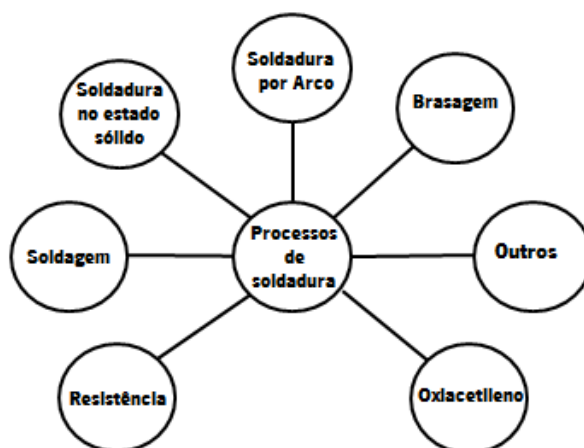


Figura 3.1- Classificação dos processos de soldadura segundo a AWS [adaptado de 14].

Nos capítulos seguintes serão abordados os procedimentos de soldadura que dizem respeito à soldadura do cobre e das suas ligas, mais especificamente do bronze. Serão também abordados alguns conceitos da metalurgia da soldadura.

### **3.1. Bases metalúrgicas da soldadura**

Na soldadura por fusão o metal é sujeito a ciclos térmicos severos e um dos objetivos dos procedimentos de soldadura é assegurar que não ocorrem danos significativos. Alterações metalúrgicas ocorrem na poça de fusão e nas zonas de alta, intermédia e de baixas temperaturas da zona termicamente afetada (ZTA), que serão aqui discutidas.

#### **3.1.1. Ciclo térmico da soldadura**

Para interpretar os fenómenos que ocorrem durante a operação de soldadura, num determinado ponto de ligação, é necessário conhecer o ciclo térmico de soldadura, isto é, a variação da temperatura ao longo de um determinado intervalo de tempo. A curva que representa essa variação está apresentada na Figura 3.2., e na qual se destacam as seguintes grandezas:

- i. Temperatura de pico ( $T_p$ ): temperatura máxima atingida. Esta diminui com a distância ao centro do cordão e indica a extensão das zonas afetadas pelo calor;
- ii. Temperatura crítica ( $T_c$ ): temperatura mínima para ocorrer alteração relevante como uma transformação de fase, por exemplo;
- iii. Tempo de permanência acima de uma temperatura crítica ( $t_c$ );
- iv. A velocidade/taxa de arrefecimento, traduzida pelo tempo de arrefecimento entre duas temperaturas,  $(T_1 - T_2 / \Delta t)$ ;

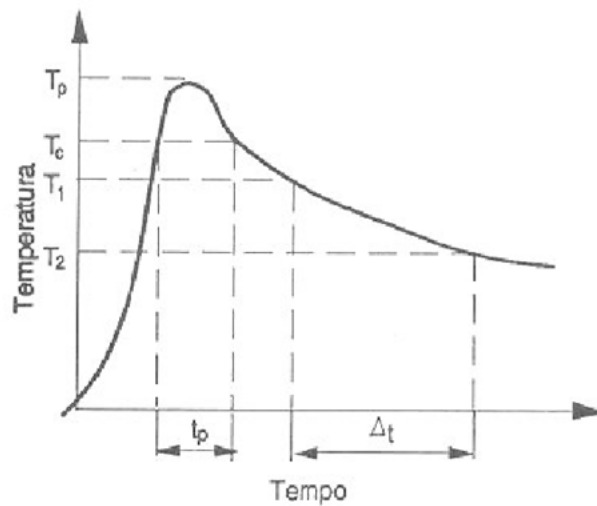


Figura 3.2- Grandezas relativas ao ciclo térmico de soldadura [Adaptado de 20].

Após a determinação das grandezas do ciclo térmico, é possível explicar ou prever os fenômenos metalúrgicos da zona de ligação, tais como, as modificações de microestrutura ou as transformações de fases no aquecimento ou no arrefecimento. Para ter acesso à repartição topográfica das modificações na junta de soldadura, é necessário conhecer as curvas que traduzem essa repartição, como a curva representada na Figura 3.3, que dá a variação da temperatura máxima atingida em cada ponto, em função da distância ao centro do cordão. Os pontos externos definem a zona termicamente afetada (ZTA). As letras apresentadas na junta de soldadura representam as seguintes macroestruturas:

- A- Cordão ou zona fundida (ZF);
- B- Zona termicamente afetada (ZTA);
- C- Metal base (MB);

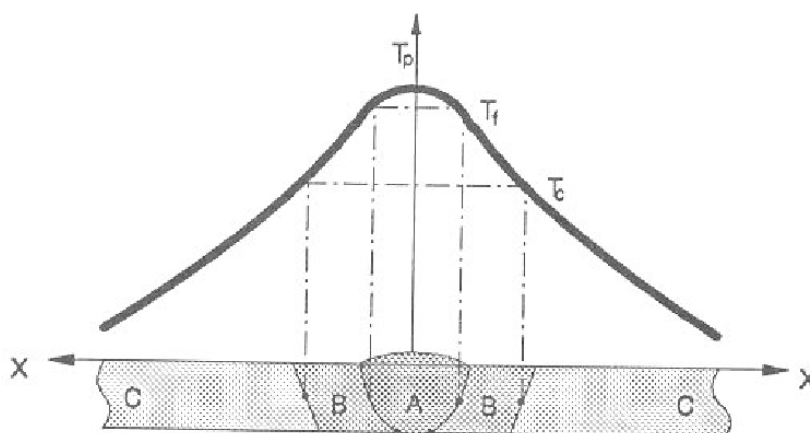


Figura 3.3- Repartição térmica de cada um dos lados da soldadura e definição da ZTA [adaptado de 20].

O ciclo e a repartição térmica são afetados pelos seguintes fatores:

- i. Tipo de metal base, quando maior a condutividade térmica, maior a velocidade de arrefecimento;
- ii. Geometria da junta, por exemplo a junta em T possui três direções para o escoamento de calor enquanto a junta de topo possui duas, arrefecendo assim, mais lentamente do que as juntas em T;
- iii. A velocidade de arrefecimento aumenta com o aumento da espessura da junta até a uma espessura limite;
- iv. A velocidade de arrefecimento diminui com o aumento da entrega térmica e da temperatura inicial da peça, e conseqüentemente torna a repartição térmica mais larga;
- v. Meio ambiente;
- vi. Soldadura em vários passes;

### **3.1.2. Poça de fusão**

O metal líquido na poça de fusão movimenta-se internamente devido às forças eletromagnéticas do arco. Há vários modelos que definem essa movimentação, que dependem do fluxo, do tipo de junta, da corrente e do ângulo que a tocha ou o eletrodo faz com a linha de solda. A composição química final do cordão é o resultado de uma mistura do eletrodo ou do metal de adição com o metal base. O metal depositado do eletrodo ou do metal de adição é diluído pelo metal base. O valor da diluição é, evidentemente, função do processo de soldadura e para um dado processo, depende do modo operatório, preparação, número de passes e energia de soldadura. Quando não existe nenhum metal adicionado, então a diluição é definida como 100 %, sendo o cordão composto inteiramente pelo metal base.

Pela Figura 3.4 pode observar-se o método de cálculo da percentagem diluída em dois exemplos de junta de soldadura.



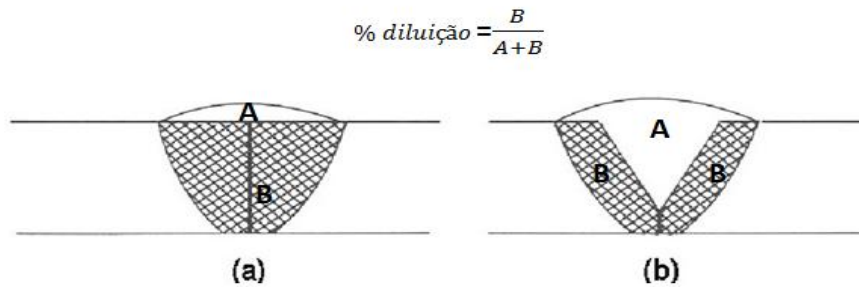


Figura 3.4- Estimativa da diluição a partir da geometria da soldadura: a) junta topo a topo; b) junta com chanfro em V [adaptado de 22].

### 3.1.3. Entrega térmica

A maioria dos processos de soldadura por fusão é caracterizada pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada. Esta energia concentrada pode gerar em pequenas regiões temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperatura e, conseqüentemente, extensas variações da microestrutura e das propriedades mecânicas em um pequeno volume de material.

Na soldadura por arco elétrico a entrega térmica (*Heat Input*) é uma característica importante pois, tal como o pré-aquecimento, e a temperatura de interpasse afeta a velocidade de arrefecimento, a qual afeta a microestrutura da solda e da ZTA, condicionando as propriedades mecânicas da junta soldada [17]. A entrega térmica é definida como o calor cedido à junta de soldadura por unidade de comprimento e é calculado pela equação [22]:

---

Esta equação é útil para comparar diferentes procedimentos de soldadura para um determinado processo de soldadura. Contudo, a entrega térmica não é necessariamente aplicável para a comparação de diferentes processos (por exemplo MMA e MIG/MAG), a não ser que, dados adicionais estejam disponíveis tal como, a eficiência de transferência térmica [26].

### 3.1.4. Pré-aquecimento

O pré-aquecimento envolve aquecer o metal base, na sua totalidade ou apenas na região envolvente à junta, a uma temperatura específica desejada, antes da soldadura. O aquecimento

pode ser contínuo, mas geralmente o calor gerado na própria soldadura é suficiente para manter a temperatura desejada sem a necessidade de manutenção de uma fonte externa de calor. A temperatura de interpasse é definida como a temperatura do metal base no momento em que a soldadura deve ser executada entre o primeiro e último passe de soldadura. Esta nunca deve ser inferior à da temperatura de pré-aquecimento. Existem quatro principais razões para se recorrer ao pré-aquecimento [19]:

- i. Diminui a taxa de arrefecimento do cordão e do metal base, produzindo uma estrutura metalúrgica mais dúctil com maior resistência à fissuração;
- ii. A diminuição da taxa de arrefecimento proporciona a oportunidade para que o hidrogénio que possa estar presente se difunda sem provocar danos, reduzindo o potencial de fissuração a quente;
- iii. Reduz as tensões de contração no cordão e na ZTA;
- iv. Adicionalmente, o pré-aquecimento pode ser utilizado para ajudar a garantir propriedades mecânicas específicas, tais como a ductilidade do cordão.

### **3.1.5. Solidificação do cordão**

Os fundamentos da solidificação do cordão são os mesmos que os da fundição, mas com diferentes condições de fronteira. Na soldadura existem gradientes de temperatura muito superiores, existindo os seguintes fenómenos:

- i. Crescimento epitaxial: A formação de novos grãos é um evento na solidificação da soldadura. Ao contrário de num lingote ou peça fundida, a soldadura forma-se pelo crescimento de grãos do metal que estão na interface sólido-líquido. Este fenómeno é chamado de crescimento epitaxial, assegura a continuidade metálica entre a zona fundida e o metal base;
- ii. Crescimento competitivo: Como a “facilidade de crescimento” de um cristal depende de sua orientação em relação ao fluxo de calor, a solidificação de vários cristais aleatoriamente orientados causa seleção, isto é, os cristais orientados desfavoravelmente tendem a parar de crescer. Este fenómeno ocorre em soldadura e pode ser responsável por um certo grau de anisotropia da zona fundida;

- iii. Segregação: devido às elevadas velocidades de solidificação da soldadura, a segregação ocorre em menor escala do que num lingote. Contudo é suficiente para causar variações localizadas de microestrutura, propriedades e mesmo problemas de fissuração, particularmente no centro do cordão. Como nas peças fundidas, o cordão é caracterizado por uma estrutura primária de grãos colunares e grosseiros. Este tipo de estrutura confere baixa tenacidade ao material;
- iv. Formação da estrutura secundária: após a solidificação, a zona fundida pode ainda sofrer alterações até ao arrefecimento à temperatura ambiente. Estas alterações podem incluir, por exemplo, o crescimento do grão, a formação de carbonetos, nitretos, fases intermetálicas, etc. Podem, ainda, ocorrer transformações no estado sólido.

As propriedades finais da zona fundida dependerão da sua estrutura final, incluindo microestruturas de solidificação secundária, e a presença de descontinuidades. Alguns defeitos que podem ocorrer na zona do cordão são:

- i. Fissuração a quente;
- ii. Porosidades;
- iii. Inclusões de escórias ou outras inclusões;
- iv. Falta de fusão;

### **3.1.6. Zona termicamente afetada (ZTA)**

Na soldadura por fusão existe sempre o aparecimento da zona termicamente afetada (ZTA). A difusão de calor para o metal base (MB) é fortemente influenciada pela temperatura da poça de fusão e pela velocidade de soldadura.

Num ponto da ZTA, logo a seguir à borda da poça de fusão a temperatura aumenta rapidamente a um nível próximo do da poça de fusão e diminui rapidamente produzindo um efeito como o de têmpera. Em aços essa região torna-se austenítica durante o aquecimento e pode conter o constituinte duro conhecido como martensite quando se arrefece. Essa região desenvolve grãos grosseiros (região de crescimento de grão), porém, numa zona onde a temperatura não foi tão alta, entrando na faixa acima da temperatura de transformação ac. mas não atingindo a região austenítica, o tamanho de grão é menor (região de maior refinação de

grão). Numa zona mais afastada, não há alteração no tamanho de grão, mas o calor é suficiente para reduzir a dureza dessa região e eliminar até certo ponto os efeitos de qualquer encruamento. Efeitos metalúrgicos similares são também observados na ZTA após cortes com a entrega térmica. Em materiais endurecíveis por solução sólida como algumas ligas de alumínio, por exemplo, a região próxima da poça de fusão torna-se efetivamente solubilizada por tratamento térmico subsequente a baixas temperaturas, causando o endurecimento por precipitação. Em materiais que não sofrem transformação, como os aços, nem endurecem por solução sólida, como ligas de alumínio tratáveis termicamente, os efeitos de calor são mais simples, sendo aplicados principalmente para reduzir a dureza e para a eliminação completa ou parcial do encruamento.

Raramente a condição de soldadura é tão simples como foi descrito acima, porque os metais base são frequentemente imperfeitos quando observados detalhadamente, sendo possível para a poça de fusão introduzir hidrogénio na ZTA proveniente da poça de fusão. Esta é portanto uma região para potencial aparecimento de defeitos. Alguns defeitos que podem ocorrer na ZTA são:

- i. Fragilidade por hidrogénio;
- ii. Por corrosão sob tensão;

### **3.2. Soldadura do cobre e suas ligas**

Os processos de soldadura por arco elétrico usados na soldadura de metais não ferrosos usam gases de proteção inertes, contudo, o processo de soldadura por eletrodo revestido (SER) pode ser usado em operações não críticas [10]. Os processos mais comuns usados são o TIG, MIG e plasma com os seguintes gases de proteção: argon, hélio ou mistura dos dois.

As propriedades físicas mais importantes do cobre relativamente aos processos de soldadura são a temperatura de fusão, coeficiente de expansão térmica e a condutividade térmica e elétrica. Certos elementos de liga diminuem consideravelmente a condutividade elétrica e térmica do cobre e suas ligas, afetando significativamente a soldabilidade. Os efeitos desses elementos de liga serão em seguida descritos [10]:

- i. Zinco: reduz a soldabilidade de todos os latões em proporção ao teor encontrado na liga. O zinco possui uma baixa temperatura de ebulição, o que resulta na produção de vapores tóxicos. Uma ventilação eficaz é obrigatória, e são necessários sistemas de captura/extração de forma a eliminar os fumos do posto de soldadura;
- ii. O estanho aumenta a tendência da fissuração a quente durante a soldadura, quando presente em quantidades de 1 a 10%. O estanho, quando comparado com o zinco, é muito menos volátil e tóxico. Durante o processo de soldadura, o estanho pode preferencialmente oxidar relativamente ao cobre. Se houve retenção desse óxido no cordão, a resistência mecânica deste pode diminuir significativamente;
- iii. O berílio, alumínio e níquel formam óxidos tenazes que têm de ser removidos antes de se iniciar a soldadura. A formação destes óxidos durante o processo de soldadura deve ser prevenida pela utilização de um gás de proteção, em conjunto com o uso apropriado da corrente de soldadura. Os óxidos de níquel interferem menos na soldadura por arco que o berílio e o alumínio;
- iv. O silício possui um efeito benéfico na soldadura de ligas de cobre-silício devido à sua ação desoxidante. A sua baixa condutividade térmica faz do bronze de silício a liga de cobre com maior soldabilidade para qualquer processo em arco;
- v. O fósforo, nas quantidades normalmente presentes na maior parte das ligas de cobre, não afeta adversamente o processo de soldadura;
- vi. O cromo, tal como o berílio e o alumínio, pode formar um óxido refratário na superfície da poça de fusão. A soldadura por arco deve ser realizada numa atmosfera protetora inerte para prevenir a formação de óxidos de cromo;
- vii. O cádmio não tem nenhum efeito sério na soldabilidade do cobre;
- viii. O oxigénio pode causar porosidades e reduzir a resistência mecânica dos cordões obtidos em ligas que não contêm quantidades suficientes de fósforo ou outros desoxidantes. O oxigénio pode ser encontrado tanto na sua forma livre ou como óxido de cobre;
- ix. O ferro e o manganês não afetam significativamente a soldabilidade;
- x. O bismuto afeta adversamente a soldabilidade das ligas de cobre, aumentando a probabilidade de fissuração a quente. Este efeito começa a ser evidente para teores superiores a 0,05 %;

- xi. O chumbo é o mais nocivo dos elementos de liga no que diz respeito à suscetibilidade de fragilização a quente.

### 3.2.1. Fatores que afetam a soldabilidade

Além dos elementos de liga, outros fatores afetam a soldabilidade. Estes são a condutividade térmica, o gás de proteção, o tipo de corrente utilizada, a preparação da junta, a posição de soldadura, e as condições da superfície.

- i. Efeito da condutividade térmica: o comportamento do cobre e das ligas de cobre durante o processo de soldadura é fortemente influenciado pela condutividade térmica da liga. O tipo de corrente e o gás de proteção devem ser selecionados de forma a fornecer a máxima entrada de calor para o cordão, diminuindo a sua dissipação. Dependendo da espessura de secção a soldar, o pré-aquecimento é necessário mesmo para ligas de cobre com uma condutividade térmica baixa. O tratamento pós-soldadura não é tão frequentemente como nos aços, contudo, algumas ligas podem exigir taxas de arrefecimento controladas para minimizar tensões residuais e fissuração a quente;
- ii. Posição de soldadura: devido à fluidez encontrada no cobre e nas suas ligas, a posição plana deve ser utilizada sempre que possível. A posição horizontal é utilizada em algumas soldaduras de canto e em juntas em T;
- iii. Endurecimento por precipitação de ligas: a soldadura, de ligas de cobre nas quais se deu o processo de endurecimento por precipitação, podem dar origem à oxidação e à fusão incompleta. Quando possível, os componentes devem ser soldados em condições de recozimento
- iv. Fragilidade a quente: as ligas de cobre, tais como cobre-estanho e cobre-níquel, têm tendência a fissurar a quente. Esta característica está presente em todas as ligas de cobre com um elevado intervalo de solidificação. Severas tensões de contração produzem separação interdendrítica durante a solidificação do metal. A probabilidade de fissuração causada pelo aquecimento pode ser minimizada fazendo um pré-aquecimento, diminuindo a velocidade de arrefecimento e reduzindo a magnitude das tensões de soldadura. Adicionalmente, pode reduzir-se o ângulo de abertura da junta de soldadura.

- v. Porosidade: certos elementos (como por exemplo, o zinco, o cádmio e o fósforo) têm baixos pontos de ebulição. A vaporização destes elementos durante o processo de soldadura pode resultar em porosidades. Nas ligas de cobre que contêm estes elementos, as porosidades podem ser minimizadas utilizando velocidades de soldadura mais rápidas e um metal de adição com estes elementos em pequenos teores.
- vi. As gorduras, tintas provenientes das marcas de lápis ou outros contaminantes similares podem causar fragilização e devem ser removidas antes de se iniciar a soldadura através de escovas metálicas ou com desengordurantes. A calamina nas ligas de cobre-níquel deve ser removida por moagem ou decapagem, escovas metálicas não são eficazes.

### 3.2.2. Soldadura do bronze

Na manufatura, a soldadura do bronze só é efetuada nas ligas obtidas por trabalho mecânico. Nas ligas fundidas, normalmente, a soldadura só é usada em reparações. O procedimento de soldadura para as ligas fundidas é semelhante ao das ligas conformadas mecanicamente e deve ser projetado de forma a minimizar a diluição, a entrega térmica e as tensões de soldadura [37]. No entanto não existem normas para os procedimentos de soldadura para as ligas fundidas.

As ligas de bronzes para conformação mecânica comercializadas segundo a UNS estão compreendidas entre C50100-C52400, apresentando teores de estanho de 1 a 10 %, e quando adicionado 0,03 a 0,04 % de fosforo, são chamadas de bronzes fosforosos. Os bronzes fundidos estão compreendidos entre C90200-C91700 e normalmente têm adições de zinco ou níquel e contêm maior teor em estanho, até 20 %.

Em condições de tensão, estas ligas estão sujeitas a fragilização a quente. O uso de pré-aquecimento, entrega térmica alta e velocidades de arrefecimento baixas devem ser evitadas. Os bronzes fosforosos com chumbo são considerados não soldáveis e a fissuração a quente é quase certa ocorrer [37].

Os bronzes fosforosos têm elevado intervalo de solidificação. Os procedimentos de soldadura devem prevenir a tendência a fissurar. Deve-se usar *hot peening* em cada camada dos

multipasses efetuados, de modo a reduzir as tensões e a probabilidade de fissuração do cordão. A soldadura de bronzes com chumbo não é recomendada, contudo algumas dessas ligas podem ser soldadas. Como já visto, a soldabilidade decresce com o aumento do teor de chumbo. Normalmente, quer a soldadura com eletrodo revestido (SER), quer a soldadura MIG, apresentam bons resultados para ligas de cobre contendo chumbo.

Em seguida apresentam-se os procedimentos e normas atualmente existentes para os bronzes fosforosos segundo a AWS ( America Welding Society):

i. Metais de adição:

Os eletrodos revestidos, os fios e as varetas podem encontrar-se segundo as especificações ANSI/AWS A5.6 e ANSI/AWS A5.7. O material de adição deve possuir composição química semelhante à do metal base.

ii. Preparação da junta

A preparação da junta deve ser em V para os bronzes com espessuras no intervalo 4 a 13 mm. O ângulo de abertura deve ser de 60 ou 70° para o processo MIG e 90 graus para o SER. Para espessuras superiores, deve usar-se junta em U a 70 graus. Para espessuras inferiores a 3,8 mm não se faz preparação de junta.

iii. Pré-aquecimento e tratamento pós soldadura

O pré-aquecimento de 177 °C a 204 °C, melhora a fluidez para secções finas. Quando usada a soldadura multipasses a temperatura não deve exceder os 204 °C, para evitar fissuração a quente. O pré-aquecimento não é necessário quando se usa MIG em modo de spray, já que este, por si, produz a energia necessária. Para uma maior ductilidade no cordão ou maior resistência à tensão sob corrosão, deve-se efetuar um tratamento pós soldadura a 482 °C, seguido de um arrefecimento rápido para a temperatura ambiente [10]. Outros autores dizem que a temperatura de pré-aquecimento deve situar-se entre 150-250 °C [24].

O "*bell metal*" é muito difícil de soldar porque é duro e frágil e suscetível a fissuração a quente. Contudo, sinos de igreja fissurados já foram reparados com soldadura a gás e com TIG com usando material de adição com a mesma composição do metal do sino [2,31,34]. Um pré



aquecimento alto e contínuo durante o processo de soldadura e um arrefecimento muito lento são medidas essenciais a serem adotadas na prevenção da fissuração [2,31,34].

Alguns autores defendem que para maiores teores de estanho deve-se usar pré-aquecimento alto e velocidades de arrefecimento baixas, para minimizar a magnitude das tensões residuais de maneira a estas não provocarem fissuração a quente.



## 4. Procedimentos experimentais

Neste capítulo é abordada a metodologia utilizada no trabalho experimental, desde a obtenção dos provetes até à soldadura dos mesmos, como também da preparação das amostras para a análise metalográfica e dos ensaios de microdureza. Todo o procedimento experimental foi realizado nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Minho.

Este trabalho foi desenvolvido em quatro etapas principais:

- i. Seleção do processo de soldadura para restauro de sinos;
- ii. Produção de materiais para a soldadura (chapas e materiais de adição);
- iii. Testes de soldadura com controlo de variáveis do processo;
- iv. Análise química do lingote e do material de adição, e análise de resultados nas chapas soldadas.

Relativamente às técnicas de soldadura disponíveis, TIG e MIG, optou-se pela TIG pelo fato de se poder controlar a composição química do material de adição, parâmetro fundamental no estudo da técnica. Não foi encontrado no mercado material de adição (varetas) de soldadura com a composição química apropriada para a soldadura dos bronzes. Desta forma a primeira etapa do trabalho consistiu na produção de varetas com a composição química e geometria apropriada ao processo de soldadura.

### 4.1. Preparação dos provetes

Os provetes de teste foram obtidos através do corte transversal de um lingote de bronze (Figura 4.1) usado na fundição de sinos. O corte foi efetuado no serrote mecânico existente nas oficinas de formação do DEM.



Figura 4.1- Lingote de bronze.

De modo a conseguir fazer o maior número possível de provetes a partir do lingote, definiu-se a espessura de cada provete para 5,5 mm, valor que está dentro dos padrões da técnica TIG [*Principles of Welding Technology- L.M. Gourd*]. O corte no serrote mecânico é automático e para tal, foi necessário fixar previamente o lingote e ajustar o corte para a medida pré-definida. Depois deste procedimento, para cada corte, colocou-se o equipamento no modo de subida até uma posição acima do lingote e em seguida em modo de operação.

Devido à falta de precisão na fixação do lingote no equipamento houve pequenas variações na espessura de alguns provetes ( $\pm 0,3$  mm). No total foram obtidos 24 provetes.

Para a posterior soldadura de topo, foi necessário cortar os provetes através do equipamento de corte com disco (Figura 4.2) presente no Laboratório de Metalurgia (Microscopia e Metalografia) do DEM. Na Figura 4.3 encontram-se representados esses cortes, em que, a partir da “fatia” proveniente do corte do lingote, se faz um corte na zona central.



Figura 4.2- Equipamento de corte discotom *STRUERS*

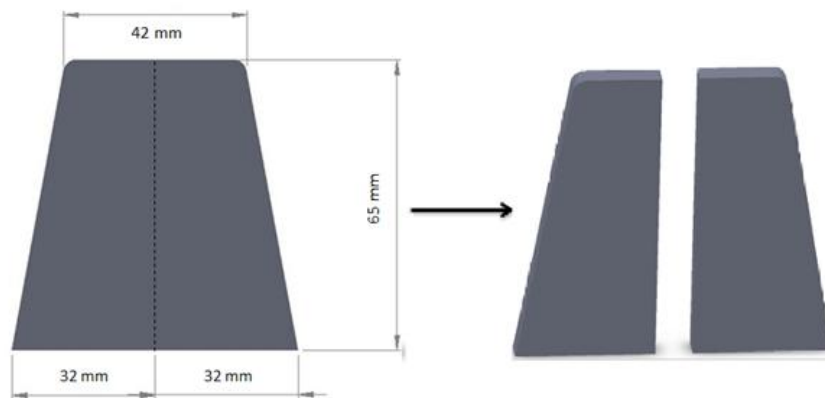


Figura 4.3- Representação esquemática do corte dos provetes.

O corte dos provetes neste equipamento foi efetuado manualmente e da seguinte forma:

- i. Fixação do provete de maneira a ser cortado a meio;
- ii. Colocação da capa plástica para isolar a lubrificação;
- iii. Garantir que a alavanca que controla o disco estivesse na posição inicial e segurá-la até ligar o equipamento.
- iv. Depois de ligar o equipamento aproximou-se o disco lentamente até atingir a peça e cortar totalmente a peça. Após o corte colocou-se o disco na posição inicial, desligou-se o equipamento e retiraram-se as amostras obtidas.

## 4.2. Fabrico do material de adição

Para fabricar o material de adição para a utilização da técnica TIG recorreu-se à tecnologia de fundição como processo de fabrico. Nesta operação procurou-se, dentro do possível, que as

varetas fundidas, e a utilizar como material de adição, tivessem o comprimento e o diâmetro necessários para a soldadura. O material usado na fundição das varetas foi o bronze que se usou nas chapas para soldadura.

Numa primeira abordagem optou-se pelo método de moldação em areia aglomerada com silicato de sódio/ $\text{CO}_2$ . Não tendo sido os resultados satisfatórios, procedeu-se para a fundição em moldação permanente, sendo a solução para a falta de fluidez e para os fracos enchimentos, bem como para o melhor controlo do diâmetro das varetas, problemas encontrados na moldação em areia aglomerada com silicato de sódio/ $\text{CO}_2$ .

#### **4.2.1. Moldação em areia de silicato de sódio/ $\text{CO}_2$**

Neste processo o material de moldação consiste numa mistura de areia de sílica com um gel viscoso de silicato de sódio. O silicato de sódio é usado como aglomerante, sendo insuflado com  $\text{CO}_2$  para polimerização da mistura, proporcionando à moldação a sua consistência final.

No fabrico da moldação foram utilizados “chassis” com a geometria apresentada na Figura 4.4, sendo realizados os seguintes passos para cada moldação:

- i. Forrar o “chassis” com cartão de modo a sustentar a areia no seu interior;
- ii. Num recipiente pesar suficiente areia de sílica para o preenchimento do volume do “chassis”;
- iii. Adicionar 3 % desse peso de silicato de sódio e misturar até otimizar a mistura;
- iv. Introduzir a mistura no “chassis” e compacta-la muito bem (manualmente);
- v. Furar a areia com varetas de aço com 4 mm de diâmetro, até à profundidade desejada (comprimento desejado para as varetas de bronze);
- vi. Perfurar o cartão através dos furos do “chassis”;
- vii. Injetar  $\text{CO}_2$  na mistura de areia, através dos furos do cartão, durante aproximadamente 15 segundos por furo, e ir rodando as varetas de aço de maneira a não ficarem totalmente presas;
- viii. Retirar as varetas da areia e separar a areia do “chassis”;
- ix. Finalmente elaborar a bacia de vazamento com o cuidado de não deixar que a areia entre nos orifícios.



Figura 4.4: “Chassis” utilizado para a moldação em areia de silicato de sódio/ $\text{CO}_2$ .

Após a construção da moldação, calculou-se a quantidade de bronze necessária para o vazamento. Sabendo o volume de cada orifício da moldação, e que 9 g de bronze correspondem a aproximadamente a  $1 \text{ cm}^3$  determinou-se a quantidade necessária para cada vazamento.

Na fusão do bronze utilizou-se o forno elétrico, tipo “mufla”, ilustrado na Figura 4.5, existente no Laboratório de Metalurgia (Tratamentos Térmicos) do DEM. Após o pré-aquecimento do cadinho à temperatura  $1150^\circ\text{C}$  retirou-se o mesmo do interior do forno com uma tenaz e umas luvas, e, rapidamente introduziu-se o bronze no cadinho e este no forno até à fusão completa do bronze. Seguidamente efetuou-se o respetivo vazamento na bacia de vazamento. Por último procedeu-se ao abate da moldação e remoção das varetas do bronze obtidas.



Figura 4.5: Mufla utilizada na fusão bronze

#### 4.2.2. Fundição em moldação permanente

A fundição em moldação permanente foi o processo utilizado no fabrico do material de adição após os resultados insuficientes obtidos na fundição por moldação em areia de silicato de sódio/ $\text{CO}_2$ . Para isso, o primeiro passo foi conseguir uma coquilha que permitisse a obtenção das varetas com as dimensões pretendidas.

A coquilha esquematizada na Figura 4.6 foi obtida através da adaptação de um molde já existente, e é constituída por duas peças, nas quais se maquinou um rasgo de 1,5 mm de diâmetro e 148 mm de comprimento, que representa o tamanho da vareta, e uma bacia de vazamento com 8 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro. No Anexo 2 encontra-se o desenho técnico da coquilha. O último passo para o fabrico da coquilha foi a abertura de rasgos oblíquos ao longo do furo, que funcionam como canais de escape para o ar contido na cavidade e os gases produzidos no vazamento. Na Figura 4.7 apresenta-se a coquilha utilizada e o pormenor dos canais de escape numa das peças que a constituem.

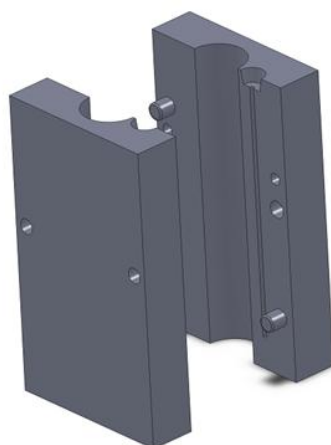


Figura 4.6- Esquema da coquilha

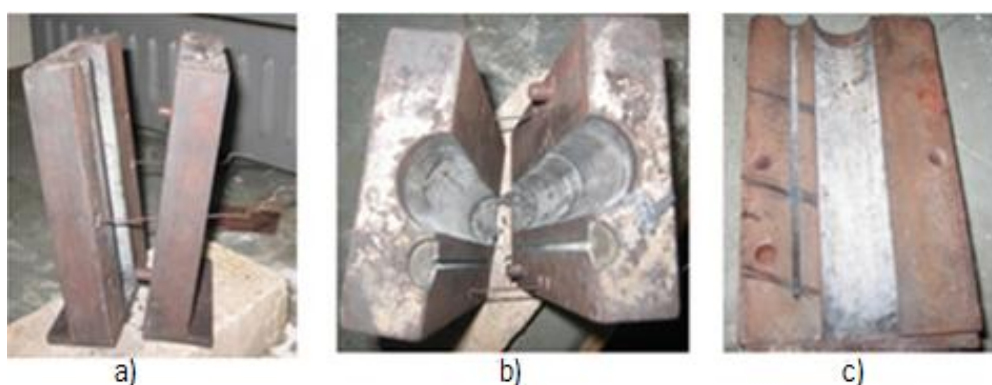


Figura 4.7- Coquilha utilizada no fabrico das varetas: a) Vista lateral; b) Vista de topo; c) Canais de escape



Os passos realizados foram os seguintes:

- i. Para além da ligação por pinos da coquilha, apertar as duas peças com um arame de aço através dos furos centrais;
- ii. Pré-aquecimento da coquilha a 550 °C durante 15 minutos;
- iii. Pré-aquecimento do cadinho a 1150 °C durante 10 minutos;
- iv. Após o pré-aquecimento do cadinho, retira-lo do forno e rapidamente introduzir 50 g de bronze e colocar novamente no forno;
- v. Esperar pela fusão do bronze (aproximadamente 5 minutos a 1150 °C);
- vi. Estando o bronze completamente fundido, retira-se em primeiro lugar a coquilha e logo a seguir efetua-se o vazamento;
- vii. Esperar que o bronze arrefeça um pouco (cerca de 1 minuto), desapertar o arame e retirar a vareta.

A mufla utilizada no pré-aquecimento e na fusão do bronze foi o anteriormente usado na fundição por moldação em areia de silicato de sódio/CO<sub>2</sub> (Figura 4.5), e o forno para o pré-aquecimento da coquilha foi o da Figura 4.8, também existente no Laboratório de Metalurgia.



Figura 4.8- Mufla utilizada no pré-aquecimento da coquilha.

Foram produzidas 10 varetas com a mesma composição do lingote base. Posteriormente foram fabricadas mais 8 varetas, desta vez com mais 5% de estanho em relação ao material base. Para esse efeito efetuou-se o procedimento acima descrito mas desta vez pesou-se 210,2 g de material base e adicionou-se 11,09 gramas de estanho no cadinho, e foi-se vazando o bronze necessário para a produção de uma vareta, até que o material no cadinho acabasse.

### 4.3. Ensaios de soldadura

Os ensaios de soldadura foram realizados no Laboratório de Soldadura do DEM, onde se soldaram no total 11 provetes, utilizando diferentes parâmetros/condições de soldadura. Os 2 primeiros ensaios serviram de teste para a manipulação do equipamento de soldadura TIG e a regulação da intensidade da corrente, tendo ambos os provetes pré-aquecimento, e ciclos de arrefecimento diferentes, como se poderá ver no capítulo 5. Constatou-se que os provetes necessitavam de preparação de junta para uma melhor penetração na soldadura.

#### 4.3.1. Preparação da junta

A preparação da junta foi realizada na fresadora existente nas Oficinas de Formação do DEM, tendo sido maquinados 9 provetes, sendo cada uma das duas partes constituintes do provete maquinada individualmente com chanfro a 45 graus e uma raiz de 2 mm, como demonstrado na Figura 4.9.

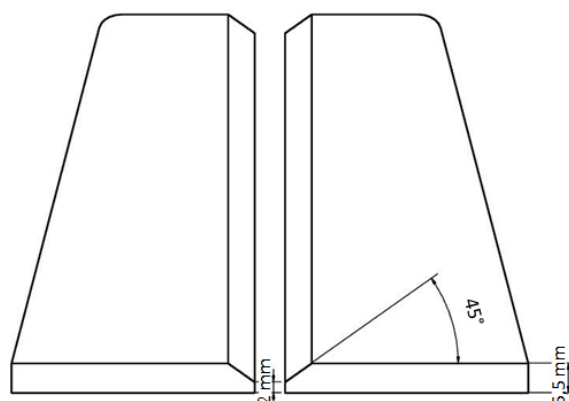


Figura 4.9- Configuração da junta de soldadura dos provetes

#### 4.3.2. Procedimentos e parâmetros de soldadura

Na soldadura dos provetes utilizou-se o equipamento *MasterTig MLS ACDC* (Figura 4.10), existente no Laboratório de Soldadura, tendo sido apenas necessário fazer a ligação à garrafa de árgon (carga de 10 m³ e pressão, a 15 °C, de 200 bar), ligar o cabo terra à mesa de soldadura, regular a intensidade da corrente e escolher o tipo de fonte. Para além das medidas de precaução inerentes à soldadura, tais como o uso do capacete e luvas, foram usados dois grampos para a fixação dos provetes na mesa de soldadura. Na Figura 4.11 é possível visualizar-

se a garrafa de árgon, a mesa de soldadura já com os grampos, e a mufla (também presente no Laboratório) usado no pré aquecimento e no ciclo de arrefecimento dos provetes.



Figura 4.10- Equipamento *MasterTig MLS ACDC*

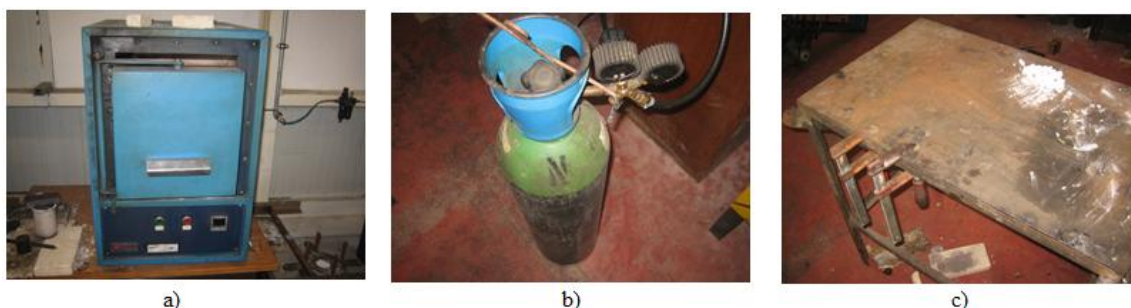


Figura 4.11- Componentes usados nos ensaios de soldadura: a) mufla; b) Garrafa de árgon; c) mesa de soldadura.

A soldadura topo a topo dos provetes foi efetuada conforme o esquema da Figura 4.12 com intensidade 90 amperes (A) da parte mais larga até meio e 110 amperes da parte mais fina até meio. Desta forma cada um dos provetes (exceto os dois primeiros) foi “dividido” em duas amostras, A e B. No subcapítulo seguinte será abordado com maior pormenor este procedimento. O gás utilizado foi o árgon e a fonte de corrente colocada em modo *Mix*.

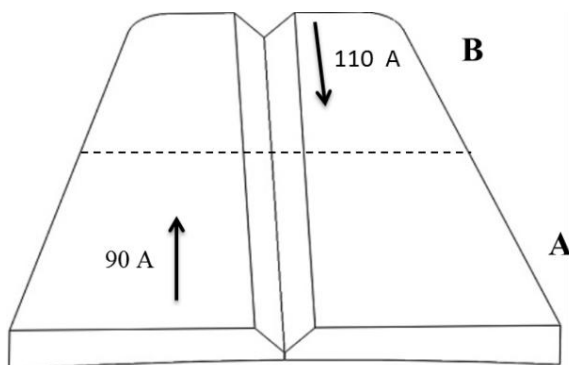


Figura 4.12- Esquema do procedimento de soldadura.

#### 4.4. Preparação das amostras para análise metalográfica

A preparação das amostras para a análise metalográfica foi realizada no Laboratório de Metalurgia (microscopia e metalografia). As visualizações das microestruturas após a soldadura foram efetuadas na secção transversal no microscópio ótico ZEISS (Figura 4.13). Cada amostra foi cortada e efetuado o desbaste, o polimento e o ataque químico na secção a analisar. Posteriormente foram transportadas para o laboratório de materiais onde se efetuou as micrografias. De modo a facilitar a descrição e análise das microestruturas dividiu-se a área das amostras em diferentes zonas (Figura 4.14):

Zona 1: Metal base do lado esquerdo;

Zona 2: Zona termicamente afetada do lado esquerdo;

Zona 3: Cordão;

Zona 4: Zona termicamente afetada do lado direito;

Zona 5: Metal base do lado direito.



Figura 4.13- Microscópio ótico ZEISS Axiotech (hal 100).

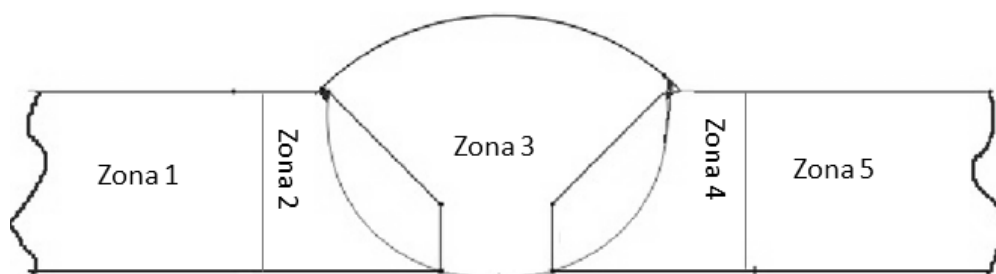


Figura 4.14- Esquema da divisão das amostras em diferentes zonas.

#### 4.4.1. Corte e identificação das amostras

Para análise das microestruturas, cada provete foi cortado em duas amostras A e B, exceto o provete 1 e 2, que foram utilizados para ensaios de teste na regulação da intensidade da corrente do equipamento de soldadura. O corte foi efetuado no equipamento de corte discotom (Figura 4.2), da forma apresentada na

Figura 4.15, em que os números das linhas a traço interrompido representam a sequência respectiva de cortes realizados, sendo que o corte n°4 representa a superfície a ser polida da amostra B e, o corte n° 5, a superfície da amostra A. O objetivo principal deste procedimento foi conseguir com que as duas superfícies de cada amostra ficassem paralelas para facilitar a análise no microscópio ótico e os ensaios de dureza.

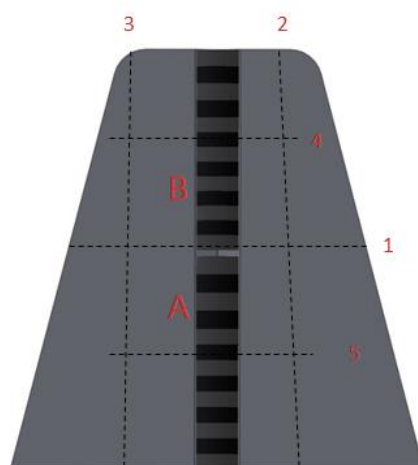


Figura 4.15- Esquema de corte das amostras.

#### 4.4.2. Polimento

O desbaste e polimento das amostras foi efetuado num equipamento PRESI *MECAPOL* (Figura 4.16), utilizando os procedimentos habituais, polindo da lixa mais grossa para a mais fina. Este procedimento foi dividido em duas etapas, o polimento grosseiro e o fino.

No polimento grosseiro passaram-se as amostras nas lixas de 180,600 e 1200 *mesh*, respetivamente. No polimento fino passaram-se as amostras por dois panos, um com spray de diamante de 6  $\mu\text{m}$  seguido de outro com 1  $\mu\text{m}$ .



Figura 4.16- Equipamento de polimento *PRESI MECAPOL*

Depois de polidas, as superfícies foram, lavadas com passagens de álcool e água, e seguidamente foram secas com um secador.

#### 4.4.3. Ataque químico

As amostras foram observadas no microscópio ótico, antes e após ataque químico, para comparação. O reagente utilizado para o ataque químico foi uma solução com a seguinte composição:

Para cada amostra o procedimento efetuado no ataque químico foi o seguinte:

- i. Num vidro de relógio colocar uma pequena quantidade de reagente;
- ii. Abrir a torneira de água e deixar a correr;
- iii. De forma cuidadosa segurar a amostra pela parte inferior à superfície polida, e mergulhar a superfície no reagente durante 2 a 3 segundos;
- iv. Passar a amostra na corrente de água, e limpar com um pedaço de algodão;
- v. Secar a amostra no secador;
- vi. Em seguida observar a amostra no microscópio ótico. No caso do ataque químico ser insuficiente, repetir os procedimentos iii, iv e v. Por outro lado, em situações de ataque químico exagerado é necessário passar a amostra no último pano (ultima etapa do polimento) para remoção da camada atacada e efetuar novo ataque.

## 4.5. Ensaios de microdureza

Os ensaios de microdureza *Vickers* foram realizados num microindentador *Shimadzu* (Figura 4.17).



Figura 4.17: Equipamento microindentador *Shimadzu*.

A dureza *Vickers* (HV) é dada pela seguinte fórmula:

$$HV = \frac{0,1891 P}{D^2}$$

Em que,

P= Carga aplicada (em gramas)

D= Média das diagonais (em micrómetros)

Neste trabalho, utilizou-se uma carga 500 gramas durante 15 segundos. As regiões das indentações podem-se visualizar na Figura 4.18, na qual a distribuição variou em algumas amostras, tendo sido indentado em mais ou menos zonas, dependendo das variações das microestruturas apresentadas.

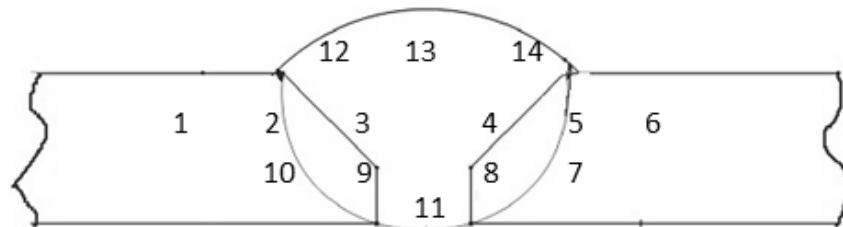


Figura 4.18- Representação esquemática da distribuição das indentações nas amostras

Na interpretação gráfica das durezas, usou-se a média e o desvio padrão das indentações obtidas nas diferentes zonas (MB, ZTA e no cordão). No total foram efetuadas 230 indentações, as quais foram medidas duas vezes, obtendo-se um erro humano de aproximadamente 4 HV na medição das microdurezas.



## 5. Análise e discussão dos resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados do fabrico do material de adição, e os resultados e discussão da influência dos parâmetros de soldadura testados em chapas de bronze do tipo usado no fabrico de sinos.

### 5.1 Material de adição

Os valores referentes às tentativas do fabrico do material de adição por moldação em areia de silicato de sódio encontram-se na Tabela 5.1, nas quais todos os vazamentos foram incompletos. No entanto na primeira tentativa conseguiu-se o enchimento de meio provete, resultando numa vareta com o comprimento suficiente para os 2 primeiros ensaios de soldadura, que foram os ensaios de teste das condições de soldadura.

As restantes tentativas resultaram em enchimentos mais incompletos, dando origem ao representado na Figura 5.1. Isto pode ser explicado pelo facto do orifício que dá origem às varetas ter apenas 4 mm de diâmetro, aliado à elevada condutividade térmica do bronze e ao largo intervalo de solidificação, que como foi observado, logo à entrada da bacia começava a ficar viscoso, criando problemas de enchimento por falta de fluidez. Outro fator que poderia estar associado ao mau enchimento são os gases que surgem no vazamento, e que criam resistência à entrada do líquido. Para resolver este problema tentou-se fazer furos perpendiculares ao da vareta, para saída de gases. No entanto, esta técnica não permitiu qualquer melhoria na extensão do enchimento da vareta.

Tabela 5.1- Valores referentes à moldação em areia de silicato de sódio/CO<sub>2</sub>.

| Tentativas | Moldação          |                       |                                | Caract. de fusão         |                           |
|------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
|            | Peso de areia (g) | Silicato de sódio (g) | Profundidade do furo (mm) x n° | Quantidade de bronze (g) | Temperatura do forno (°C) |
| 1°         | 476,67            | 14,400                | 9,5 X 1                        | 11                       | 1050                      |
| 2°         | 454,06            | 13,621                | 9,5 X 6                        | 60                       | 1150                      |
| 3°         | 1762,44           | 52,878                | 13 X 6                         | 90                       | 1150                      |
| 4°         | 1683,50           | 51,015                | 13 X 4                         | 90                       | 1150                      |



Figura 5.1- Resultado da fundição por moldação em areia de silicato de sódio/ $\text{CO}_2$ .

De forma a ultrapassar os problemas encontrados na fundição por moldação em areia de silicato de sódio/ $\text{CO}_2$ , decidiu-se avançar para a técnica de moldação permanente. Desta maneira os problemas da fluidez e da libertação dos gases foram resolvidos através do pré-aquecimento da coquilha e da abertura de canais de escape de gases no orifício onde o líquido é vazado, respetivamente. O resultado obtido foi satisfatório, as varetas apresentaram um aspeto idêntico ao das figuras Figura 5.2 Figura 5.3. A variação na quantidade de rebarba resultado do maior ou menor aperto do arame da coquilha.



Figura 5.2- Varetas de bronze fabricadas a partir do material base.



Figura 5.3: Vareta de bronze fabricada a partir do metal base c/ + 5% de Sn.

As varetas da Figura 5.2 correspondem às fabricadas com o metal base e a da Figura 5.3 corresponde à fabricada com mais 5% de estanho, podendo-se constatar que a última apresenta

um tom dourado mais claro. Na Tabela 5.2 apresenta-se a composição química das varetas e do lingote (metal base). Pode-se verificar que na fundição das varetas uma pequena parte do estanho oxidou (entre 2 % e 2,5 %), sendo ainda de registar uma redução significativa dos teores de Pb e Zn, que deverá ter igualmente tido origem na oxidação daqueles elementos.

Tabela 5.2- Composição química do lingote e das varetas em peso (obtido por FRX)

| <b>Materiais</b>          | <b>Cu (%)</b> | <b>Sn(%)</b> | <b>Pb (%)</b> | <b>Zn (%)</b> | <b>Ni (%)</b> | <b>P (%)</b> | <b>Fe (%)</b> | <b>Sr (%)</b> | <b>S (%)</b> | <b>Cr (%)</b> |
|---------------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| Lingote                   | Restante      | 20           | 2,21          | 0,684         | 0,037         | 0,052        | 0,031         | 0,167         | 0,000        | 0,000         |
| Varetas                   | Restante      | 17,80        | 1,48          | 0,149         | 0,065         | 0,039        | 0,00          | 0,00          | 0,029        | 0,277         |
| Varetas c/ + 5 %<br>de Sn | Restante      | 22,50        | 1,81          | 0,285         | 0,083         | 0,031        | 0,279         | 0,000         | 0,000        | 0,433         |

## 5.2 Influência das condições de soldadura

Nos subcapítulos seguintes são apresentados e discutidos os efeitos dos parâmetros de soldadura testados neste trabalho, nas características da junta soldada, nomeadamente na microestrutura e na microdureza. Em todas as amostras o tipo de estruturas encontrado nas diferentes zonas foram estruturas dendríticas. No Anexo 3 e 4 encontram-se micrografias obtidas das amostras e os valores de microdureza de todas as indentações efetuadas, respetivamente.

Na Figura 5.4 b) encontra-se uma micrografia do bronze no estado em que foi recebido (lingote). A rede de dendrites, representada pela cor mais clara, corresponde à fase alfa, e entre as dendrites, com cor escura, são perceptíveis pequenas ilhas do constituinte eutetóide  $\alpha + \delta$ . Este tipo de microestrutura assemelha-se ao descrito na bibliografia [23,32].

Em escalas de menor ampliação, este constituinte eutetóide torna-se difícil de visualizar, como se pode observar na Figura 5.4 a), onde também se pode reparar que existe uma variação no padrão das dendrites, que surgem desenvolvidas de forma muito longa e fina.

A fase alfa é dúctil e rica em cobre, e o constituinte  $\alpha + \delta$  é mais rico em estanho e mais duro, como comprovado pelos valores de dureza média de 200 HV e 229 HV, respetivamente. Verificou-se que o valor médio de dureza da amostra foi 219  $\pm$  10 HV e que continha pequenas porosidades.

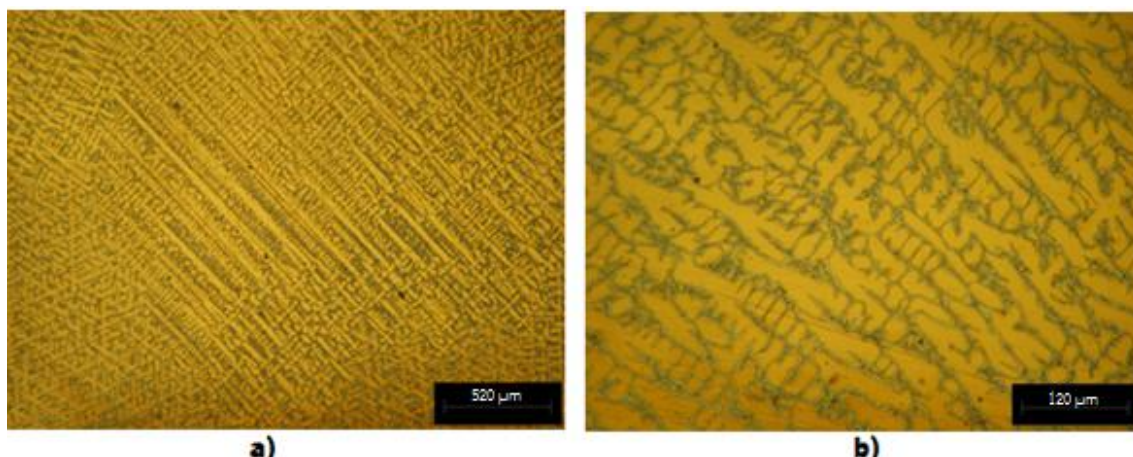


Figura 5.4- Micografias do metal base: a) variação do padrão das dendrites; b) Dendrites e constituinte eutetóide em pormenor.

### 5.2.1. Definição dos parâmetros bases de soldadura

O gás de proteção e o tipo de corrente foram parâmetros fixos em todos os ensaios, sendo o árgon o gás usado e o aparelho de soldadura utilizado em modo “mix”, no qual há um controlo automático da corrente de soldadura.

Os parâmetros a controlar neste estudo foram a temperatura de pré-aquecimento das chapas a soldar, a velocidade de arrefecimento após soldadura, a intensidade da corrente e o material de adição. A escolha das temperaturas de pré-aquecimento foi baseada nos parâmetros de soldadura existentes para bronzes (de menor teor em estanho) e segundo as propriedades da liga em específico. Como se referiu no capítulo 3, a temperatura de pré-aquecimento aconselhada para bronzes em geral deve ser alta, mais especificamente de 150-250 °C para bronzes fosfóricos (quimicamente mais parecida). Assim, definiram-se as temperaturas de 250 °C e de 400 °C de modo a verificar o efeito do aumento da temperatura de pré-aquecimento nas características de soldadura.

Nos capítulos 1 e 3 é referido que o arrefecimento após soldadura deve ser lento. Tendo em conta o enunciado, efetuou-se o arrefecimento no forno a partir das temperaturas 250 °C e de 400 °C, à velocidade de 0,5 °C/min, e ao ar, de modo a verificar o efeito deste parâmetro nas características da soldadura.

Quanto ao material de adição também é referido na bibliografia que deve ser igual à composição do material base, no entanto sabe-se que na soldadura o Sn oxida mais rapidamente que o Cu (também comprovado na fundição das varetas). Assim adicionou-se mais 5 % de Sn ao metal base de forma a compensar essas perdas.

Os dois primeiros ensaios de soldadura realizados neste estudo serviram como ensaios de teste para a definição da intensidade de corrente mais indicada para as condições de soldadura existentes. O primeiro foi efetuado com a intensidade de 100 A, pré-aquecimento de 250 °C e arrefecido ao ar. O segundo ensaio foi efetuado com os mesmos parâmetros variando o ciclo de arrefecimento, sendo este efetuado no forno a partir de 250 °C com a velocidade de 0,5 °C/min.

Observou-se na soldadura dos dois provetes que, com a intensidade de 100 A, a poça de fusão era fluida, no entanto constatou-se que não se obteve penetração total na amostra 1 e que na amostra 2 a fusão não foi completa, como comprovado pela Figura 5.5. Também se pode notar que na amostra 2, existe uma fissura na zona do cordão, que se prolonga ao longo do mesmo.

Tendo em conta estes resultados ficou definida a utilização de intensidades de corrente de 90 A e 110 A, de forma a verificar o efeito da variação de intensidade nas características do cordão. As soldaduras foram efetuadas topo a topo, com uma junta em V, com ângulo de abertura 45° e de raiz 2 mm, de modo a facilitar a ocorrência de penetração total. Na Tabela 5.3 pode-se observar os parâmetros de soldadura utilizados nos ensaios de soldadura.

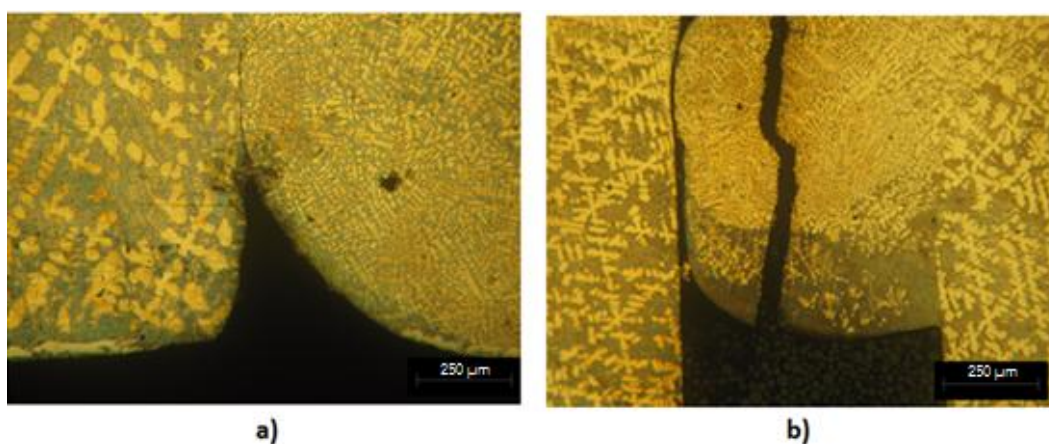


Figura 5.5- Fusão incompleta dos ensaios de teste, soldados a 110 A e com pré-aquecimento de 250 °C: a) amostra 1 arrefecida ao ar; b) amostra 2 arrefecida no forno a partir de 250 °C.

Tabela 5.3 - Parâmetros de soldadura testados neste trabalho.

| Provete | Pré-aquecimento (°C) | Arrefecimento                                   | Tensão (A) | Material de adição |
|---------|----------------------|---|------------|--------------------|
| 1       | 250                  | 0,5 °C/min desde 250 °C                         | 100        | Material base      |
| 2       | 250                  | Ar  | 100        | Material base      |
| 3A      | 400                  | Ar  | 90         | Material base      |
| 3B      | 400                  | Ar  | 110        | Material base      |
| 4A      | 250                  | 0,5 °C/min desde 250 °C                         | 90         | Material base      |
| 4B      | 250                  | 0,5 °C/min desde 250 °C                         | 110        | Material base      |
| 5A      | 400                  | 690 °C a 400 °C; <sup>3</sup><br>400 °C a 25 °C | 90         | Material base      |
| 5B      | 400                  | 690 °C a 400 °C;<br>400 °C a 25 °C              | 110        | Material base      |
| 6A      | 250                  | Ar  | 90         | Material base      |
| 6B      | 250                  | Ar  | 110        | Material base      |
| 7A*     | 400                  | Ar  | 90         | M.B. + 5% de Sn    |
| 7B      | 400                  | Ar  | 110        | M.B. + 5% de Sn    |
| 8A      | 400                  | 0,5 °C/min desde 400 °C                         | 90         | M.B. + 5% de Sn    |
| 8B      | 400                  | 0,5 °C/min desde 400 °C                         | 110        | M.B. + 5% de Sn    |
| 9A      | 400                  | 0,5 °C/min desde 400 °C                         | 90         | Material base      |
| 9B      | 400                  | 0,5 °C/min desde 400 °C                         | 110        | Material base      |
| 10A     | 250                  | Ar  | 90         | M.B. + 5% de Sn    |
| 10B     | 250                  | Ar  | 110        | M.B. + 5% de Sn    |
| 11A     | 250                  | 0,5 °C/min desde 200 °C                         | 90         | M.B. + 5% de Sn    |
| 11b     | 250                  | 0,5 °C/min desde 200 °C                         | 110        | M.B. + 5% de Sn    |

<sup>3</sup> O arrefecimento do provete 5 (amostra 5A e 5B) foi produto de um erro na programação da mufla, que era suposto arrefecer a partir dos 400 °C, erro retificado no provete nº9 (amostra 9A e 9B).

\* A amostra 7 A foi soldada com pouco argon.

### 5.2.2. Efeito da temperatura de pré-aquecimento

Para se verificar o efeito da temperatura de pré-aquecimento, utilizaram-se as temperaturas de 250 °C e 400 °C. De forma a também confirmar os resultados efetuam-se dois tipos de comparações. A primeira comparação entre as amostras 3 B e 6 B, e a segunda entre 7 B e 10 B variando nesta o material de adição (Tabela 5.4).

Tabela 5.4- Parâmetros utilizados na verificação do efeito da temperatura de pré-aquecimento.

| Amostra | Temperatura de Pré-aquecimento (°C) | Intensidade (A) | Arrefecimento | Material de Adição |
|---------|-------------------------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| 3 B     | 400                                 | 110             | Ar            | MB                 |
| 6 B     | 250                                 | 110             | Ar            | MB                 |
| 7 B     | 400                                 | 110             | Ar            | MB + 5% Sn         |
| 10 B    | 250                                 | 110             | Ar            | MB + 5% Sn         |

A amostra 6 B apresenta porosidades, algumas de diâmetro elevado, e não se obteve penetração total, enquanto na 3 B obteve-se penetração total e um cordão praticamente sem porosidades. Em relação à microestrutura encontrada na amostra 3 B, pela Figura 5.6 pode-se reparar que na transição do MB para a ZTA existe pouca alteração, aumentando ligeiramente o espaçamento interdendrítico, exceto na parte superior da zona 4, onde se podem observar estruturas dendríticas maiores. O crescimento pode ser explicado pelo calor gerado nessa área, e pelo facto do metal base, já nessa zona conter dendrites desse espeto. Na mesma figura observa-se elevada refinação da microestrutura na passagem para o cordão. Na Figura 5.7, visualiza-se o padrão da microestrutura do cordão, e repara-se que existe uma pequena variação, sendo ligeiramente mais refinado na parte superior. De referir também que se observou na ZTA maior migração da fase alfa das extremidades das dendrites para a zona eutetóide, e também formações muito pequenas da fase eutetóide no interior das dendrites.



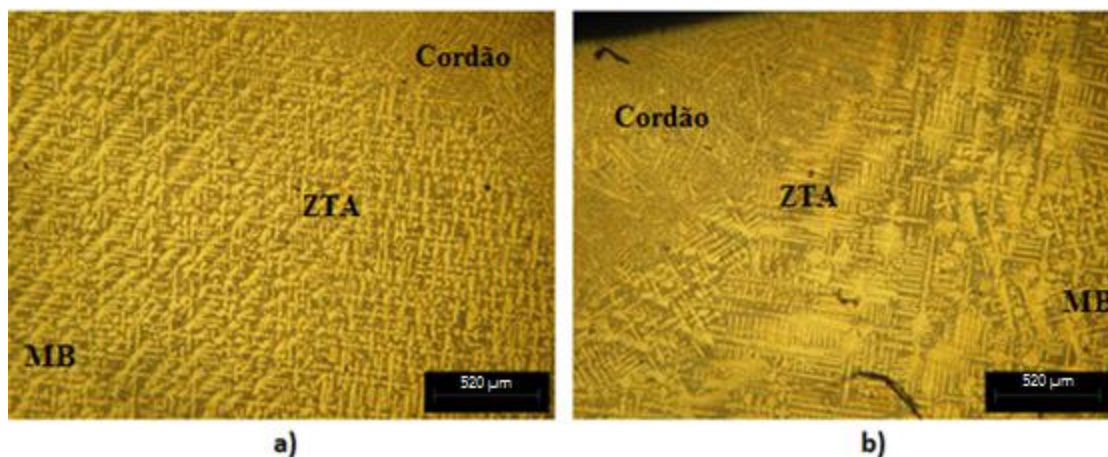


Figura 5.6- Transições da ZTA da amostra 3 B: a) transição do MB /ZTA e ZTA/cordão na zona 1, 2 e 3; b) transição Cordão/ZTA e ZTA/MB na zona 3,4 e 5.

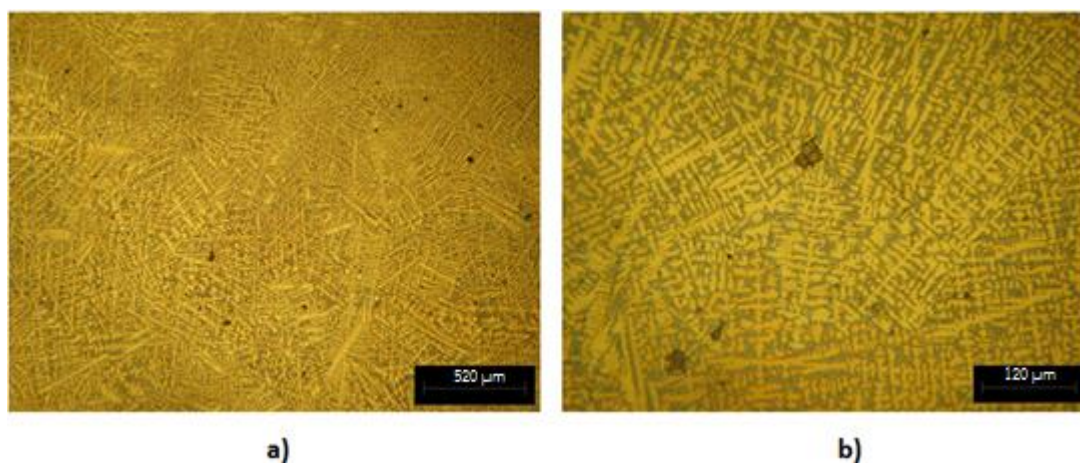


Figura 5.7- Cordão da amostra 3 B: a) em menor ampliação; b) em maior ampliação.

A amostra 6 B, apresenta na ZTA uma microestrutura mais grosseira que a apresentada na amostra 3 B, com maior espaçamento interdendrítico. Na Figura 5.8 é visível a diferença entre o MB e a ZTA na qual pode confirmar o descrito anteriormente. O Cordão também apresenta maior espaçamento interdendrítico e menor fase alfa, em relação ao cordão da amostra 3 B como se pode verificar pela Figura 5.9.



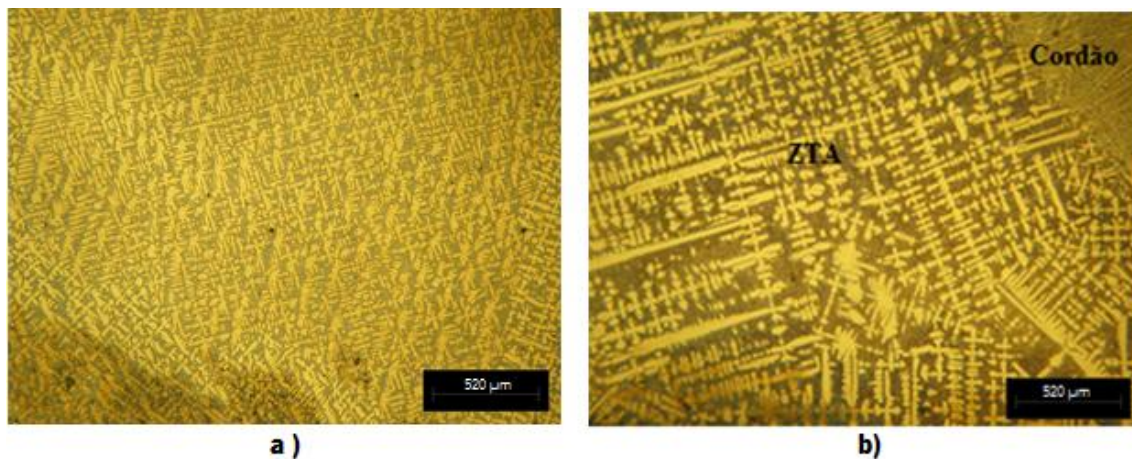


Figura 5.8 – Microestrutura da amostra 6 B: a) MB na zona 1; b) Transição ZTA/Cordão na zona 2 e 3.

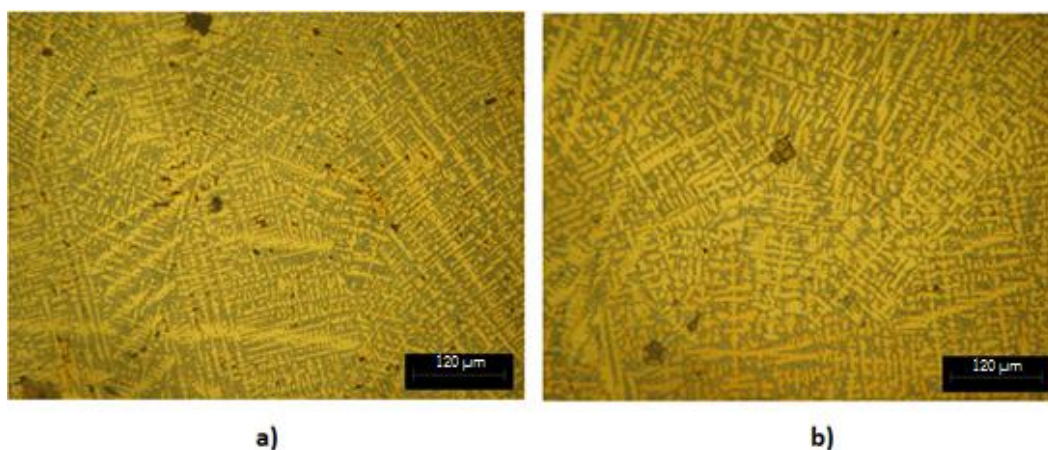


Figura 5.9- Comparação entre o cordão da amostra 6 B e 3 B: a) cordão da amostra 6 B; b) cordão da amostra 3 B.

No gráfico da Figura 5.10 pode-se observar a evolução dos valores médios de microdureza obtidas nas diferentes zonas das duas amostras. A dureza da amostra 3 B mantém-se mais ou menos uniforme, aumentando na ZTA, correspondendo ao ligeiro aumento do espaço interdendrítico que se regista nessa zona. A amostra 6 B apresenta uma variação mais brusca de durezas, aumentando cerca de 20 HV na ZTA e de 10 HV no cordão. Também se pode confirmar que a dureza do cordão da amostra 3 B é inferior à do cordão da amostra 6 B, resultante do anteriormente descrito quando da comparação da microestrutura dos dois cordões.

Pela Tabela 5.5 pode-se constatar a uniformidade de durezas da amostra 3 B, ao contrário da amostra 6 B, que apresenta um desvio padrão alto na ZTA, devido ao facto se tratar de uma microestrutura mais grosseira.

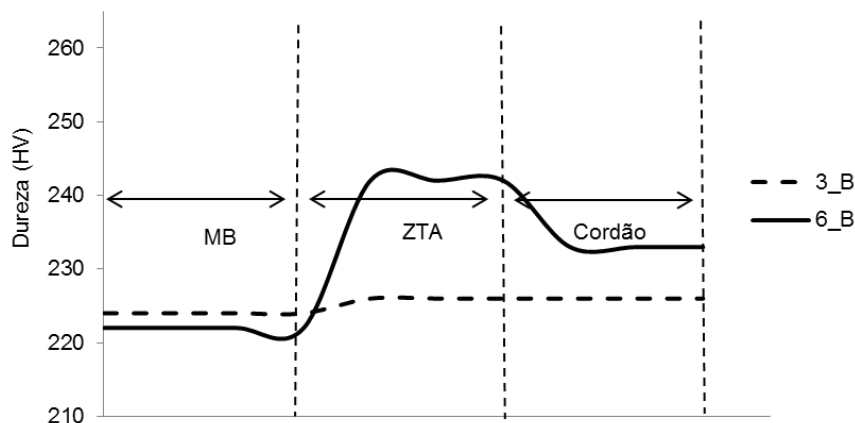


Figura 5.10- Evolução da dureza ao longo da junta de soldadura, para diferentes temperaturas de pré-aquecimento (400 °C na amostra 3 B e a 250 °C na amostra 6 B).

Tabela 5.5- Valores médios de dureza das amostras 3B e 6 B.

|                    | Zona   | Durezas (HV) |
|--------------------|--------|--------------|
| <b>Amostra 3B</b>  | MB     | $224 \pm 1$  |
|                    | ZTA    | $226 \pm 5$  |
|                    | Cordão | $226 \pm 7$  |
| <b>Amostra 6 B</b> | MB     | $222 \pm 2$  |
|                    | ZTA    | $242 \pm 32$ |
|                    | Cordão | $\pm 11$     |

Na amostra 10 B obteve-se penetração total ao contrário da amostra 7 B, e a fração volúmica de porosidades é reduzida em ambas as amostras. Pela Figura 5.11 pode observar-se que na transição MB/ZTA da amostra 7 B a alteração microestrutural é ligeira, e que na transição ZTA/cordão existe uma grande refinação da estrutura como anteriormente visto nas amostras 3 B e 6 B. No cordão parece existir mais constituinte eutetóide.

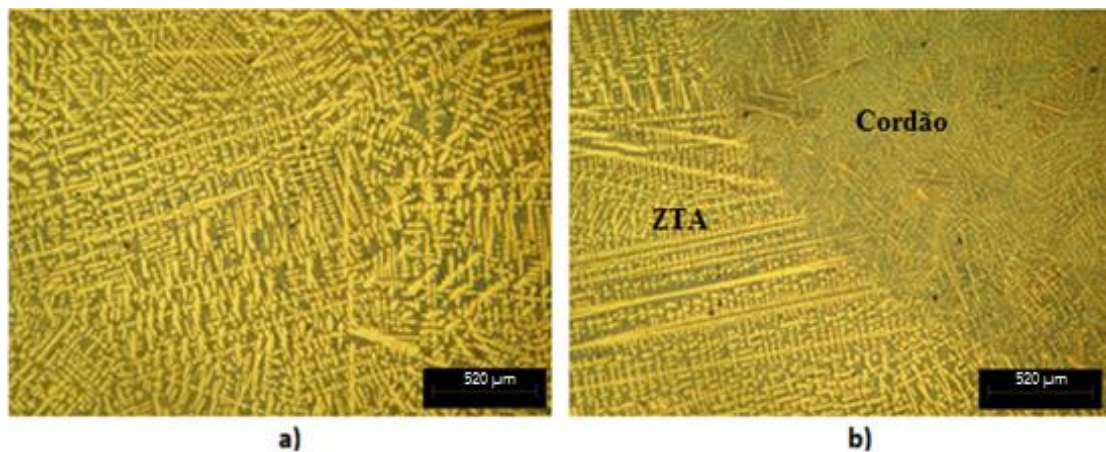


Figura 5.11- Microestrutura da amostra 7 B: a) MB; b) transição ZTA/Cordão

Na amostra 10 B, a transição MB/ZTA é um pouco mais acentuada, e a transição ZTA/cordão é muito semelhante à observada na amostra 7 B (Figura 5.12).

Na interpretação do gráfico da Figura 5.13, consegue-se verificar o efeito da variação do metal de adição para mais 5 % de Sn, aumentando a dureza do cordão nas duas amostras substancialmente, entre 25 a 30 HV, em relação aos ensaios realizados com o material de adição igual ao MB (Figura 5.10). O aumento de dureza, como esperado, estará associado ao aumento da fração volúmica do constituinte eutetóide com o aumento do teor de estanho do material (Figura 2.1). Na Figura 5.14 pode-se verificar esse aumento, que é mais acentuado na amostra 7 B.

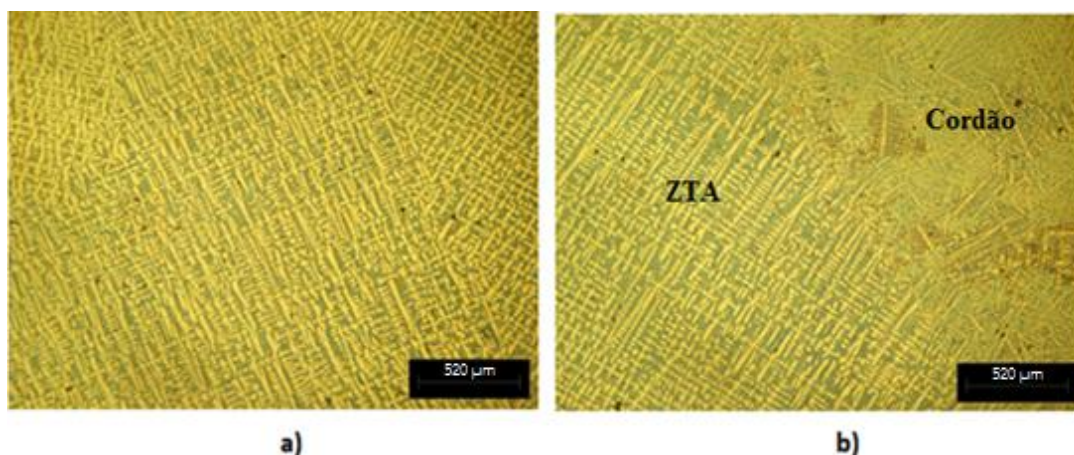


Figura 5.12- Microestrutura da amostra 10 B: a) MB; b) transição ZTA/cordão



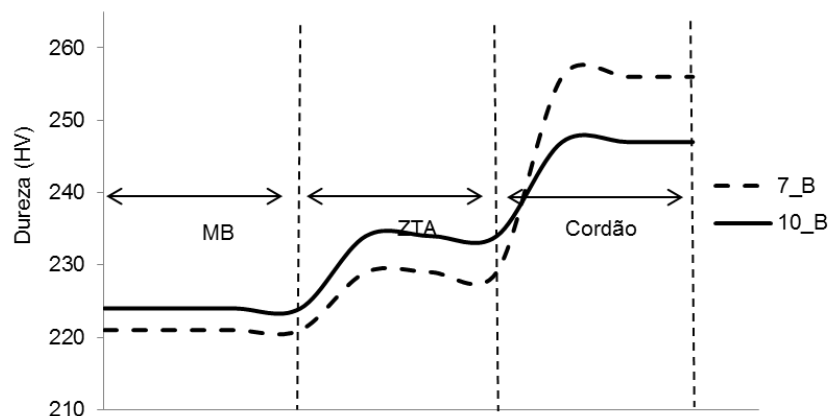


Figura 5.13- Evolução da dureza na junta de soldadura com as diferentes temperaturas de pré-aquecimento, a 400 °C na amostra 7 B e a 250 °C na amostra 10 B.

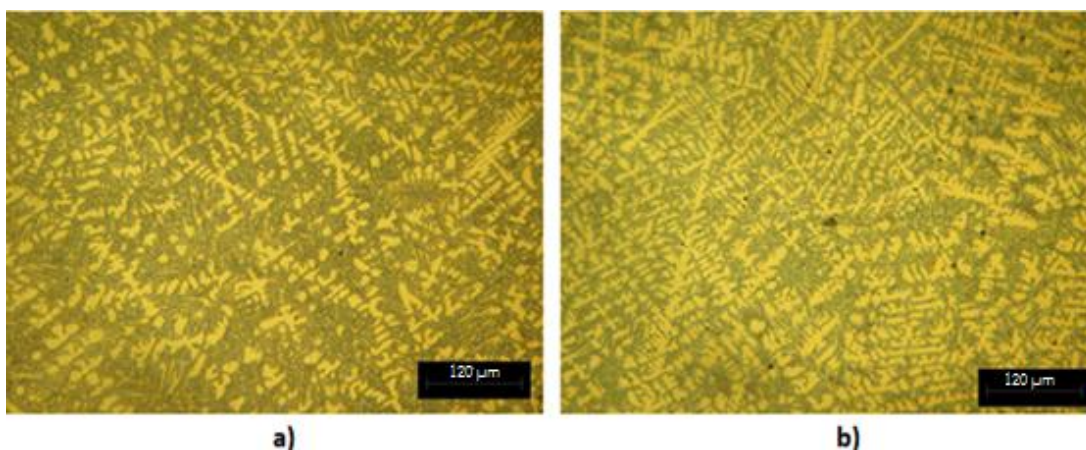


Figura 5.14- Aumento da fração volumétrica do constituinte eutetóide na zona do cordão: a) Na amostra 7 B; b) Na amostra 10 B

Observando a Tabela 5.6 verifica-se que, tanto o cordão como a ZTA, apresentam desvios padrão baixos, principalmente a dureza da ZTA da amostra 10 B, que comparando com a amostra 6 B que com o mesmo pré-aquecimento obteve uma variação de  $242 \pm 32$ , muito maior.

Tabela 5.6: Valores médios de dureza das amostras 7 B e 10 B.

|                     | Zona   | Durezas     |
|---------------------|--------|-------------|
| <b>Amostra 7 B</b>  | MB     | $221 \pm 3$ |
|                     | ZTA    | $\pm 7$     |
|                     | Cordão | $\pm 14$    |
| <b>Amostra 10 B</b> | MB     | $\pm 11$    |
|                     | ZTA    | $\pm 5$     |
|                     | Cordão | $\pm 12$    |

Na amostra 3 B verificou-se que o aumento da temperatura de pré-aquecimento resultou numa diminuição da dureza na ZTA e no cordão, em relação à amostra 6 B. Na amostra 7 B o aumento da temperatura de pré-aquecimento também provocou uma diminuição de dureza na ZTA em relação à amostra 10 B mas menos significativa. No entanto, e ao contrário ao sucedido entre as amostras 3 B e 6 B, provocou um aumento de dureza no cordão. Isto pode ser explicado pelo fato de não se ter obtido penetração total, tal como aconteceu com a amostra 6 B (menor entrega térmica na soldadura).

As durezas obtidas na ZTA e no cordão de soldadura são, como pretendido, sempre superiores às do MB indicando que a qualidade de soldadura é, neste aspeto, aceitável. Em geral pode concluir-se que os ajustes efetuados durante a operação de soldadura (velocidade de soldadura etc.) se podem sobrepor ao efeito da temperatura de pré-aquecimento no resultado final. No entanto, o maior aumento da dureza obtido na amostra com mais baixa temperatura de pré-aquecimento (6 B) pode indicar a tendência para a fragilização na ZTA quando se baixa a temperatura de pré-aquecimento. Este resultado deverá ser confirmado com a realização de testes de soldadura sem pré-aquecimento ou a temperaturas mais baixas do que as utilizadas neste trabalho.

O aumento do teor de estanho no material de adição provoca um aumento de dureza na ZTA e, essencialmente, no cordão de soldadura. Conclui-se que não é necessário um aumento tão elevado do teor em estanho (2,5 %) para garantir as propriedades mecânicas ligeiramente superiores na zona de soldadura.

### **5.2.3. Efeito da velocidade de arrefecimento**

Para se verificar o efeito da velocidade de arrefecimento fixou-se os valores de pré-aquecimento e de intensidade, variando-se o meio de arrefecimento para o arrefecimento no forno, a 250 °C e 400 °C, à velocidade de 0,5 °C/min. Desta forma compara-se o efeito do ciclo de arrefecimento no forno com o arrefecimento ao ar, entre as amostras 4 B e 6 B, 9 B e 3 B, 8 B e 7 B, e entre as amostras 11 B e 10 B. Na Tabela 5.7 apresentam-se os parâmetros dessas amostras e relembram-se os anteriores.

Tabela 5.7- Parâmetros utilizados na verificação do efeito da velocidade de arrefecimento.

| Amostra | Temperatura<br>de<br>Pré-aquecimento<br>(°C) | Intensidade<br>(A) | Arrefecimento | Material<br>de<br>adição |
|---------|--|--------------------|---------------|--------------------------|
| 4 B     | 250  | 110                | 0,5 °C/min    | Metal base               |
| 6 B     | 250  | 110                | Ar            | Metal base               |
| 9 B     | 400  | 110                | 0,5 °C/min    | Metal base               |
| 3 B     | 400  | 110                | Ar            | Metal base               |
| 8 B     | 400  | 110                | 0,5 °C/min    | MB + 5% Sn               |
| 7 B     | 400  | 110                | Ar            | MB + 5% Sn               |
| 11 B    | 250  | 110                | 0,5 °C/min    | MB + 5% Sn               |
| 10 B    | 250  | 110                | Ar            | MB + 5% Sn               |

Ao nível da junta de soldadura a amostra 4 B obteve penetração total, ao contrário da amostra 6 B, mas esta diferença não pode ser explicada pelo ciclo de arrefecimento, pois este não influencia a penetração.

A microestrutura da ZTA da amostra 4 B é menos grosseira do que na amostra 6 B. Na Figura 5.15 apresenta-se a transição da ZTA para o cordão, e comparando com a da Figura 5.8 b) repara-se que foi menos afetada, apresentando menor espaçamento interdendrítico.

No cordão existe alguma diferença entre a parte superior e a mais central, justificado pela diferença do gradiente térmico, arrefecendo mais rapidamente na parte superior. Consequentemente, a microestrutura fica mais refinada como já anteriormente verificado. Na amostra 4 B essa diferença é menos acentuada, sendo o cordão mais uniforme, com maior crescimento da fase alfa, como comprovado pela média de durezas do cordão observado na Figura 5.16 e pelo menor desvio de padrão na média das microdurezas do cordão, sendo 6 HV na amostra 4 B contra os 11 HV da amostra 6 B. A dureza da ZTA também diminuiu, e como constatado na microestrutura é mais uniforme, apresentando menor desvio padrão, cerca de metade.

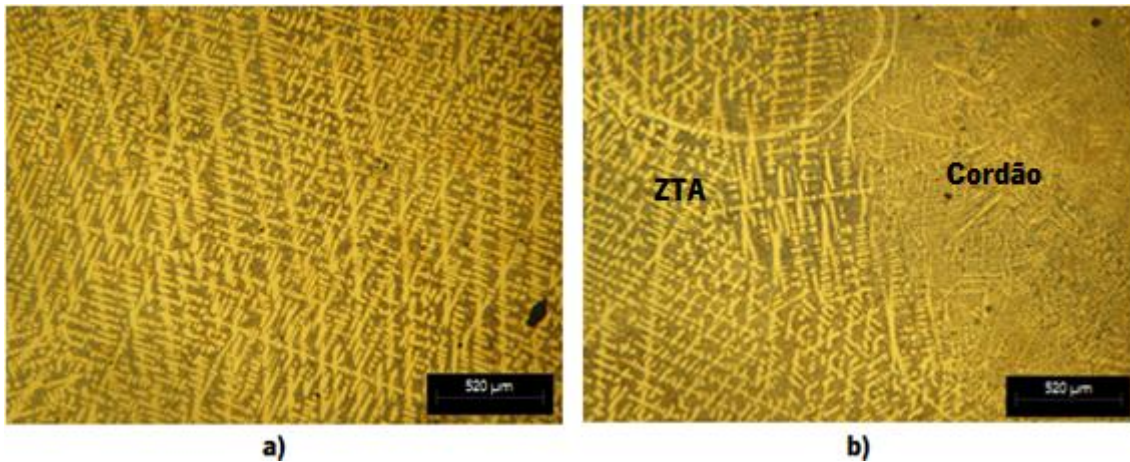


Figura 5.15- Microestrutura da amostra 4 B: a) MB na zona 1; b) transição ZTA/Cordão na zona 2 e 3.

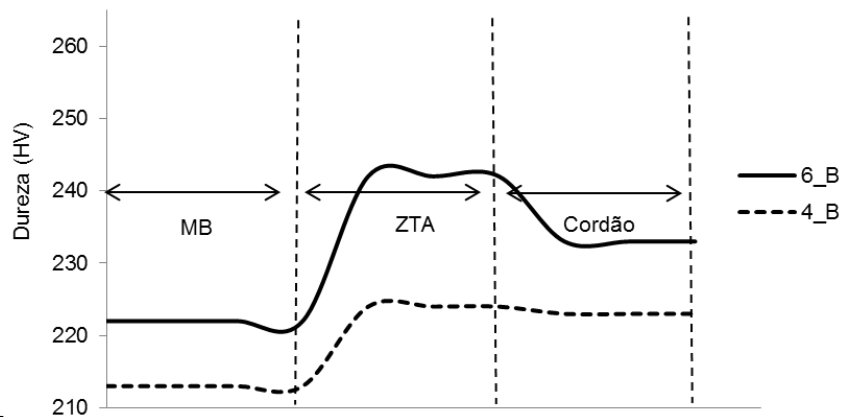


Figura 5.16- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes condições de arrefecimento, sendo a amostra 6 B arrefecida ao ar e a amostra 4 B no forno (a 250 °C com velocidade de arrefecimento de 0,5 °C/min).

Relativamente à amostra 9 B, o cordão apresentou um número muito elevado de porosidades algumas de grande diâmetro (Figura 5.17 a)), o que pode ser explicado pela insuficiência do gás de proteção. Na passagem do MB para a ZTA, e desta para o cordão, a amostra 9 B apresenta resultados semelhantes à amostra 3 B. O cordão apresenta uma estrutura uniforme e, comparando as Figura 5.9 b) e Figura 5.17 b), pode-se reparar que as dendrites têm maior tamanho e estão mais espaçadas entre elas.

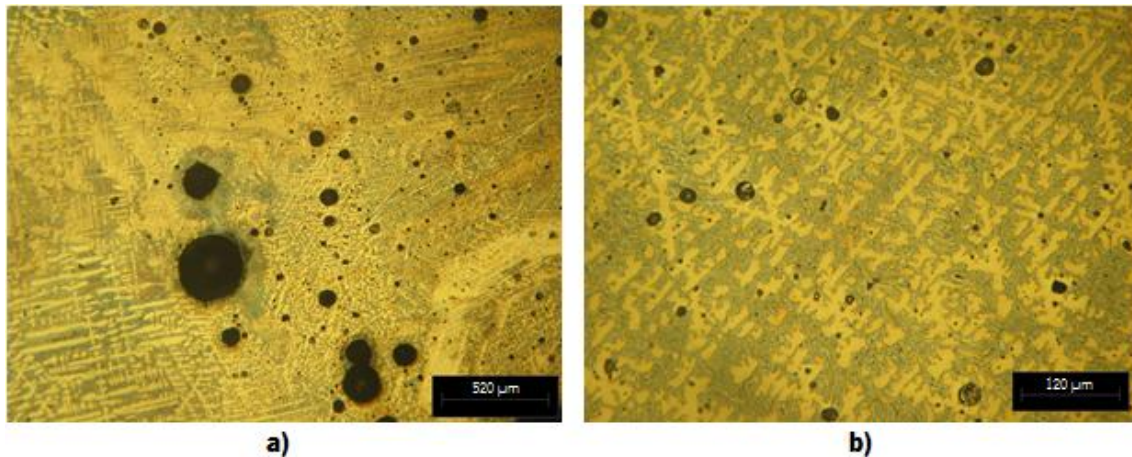


Figura 5.17- Micrografia da amostra 9 B: a) porosidades na zona do cordão; b) microestrutura dendrítica no cordão

Pela Figura 5.18 nota-se, que a diminuição da velocidade de arrefecimento provocou, tal como na amostra 4 B, uma ligeira diminuição da dureza. Neste caso as durezas ficaram quase iguais às do MB ( $220 \pm 2$ ), sendo a da ZTA  $221 \pm 16$  e do cordão  $220 \pm 7$ . Resultados que não se devem considerar tendo em conta as condições de soldadura (provavelmente soldado com pouco argon).

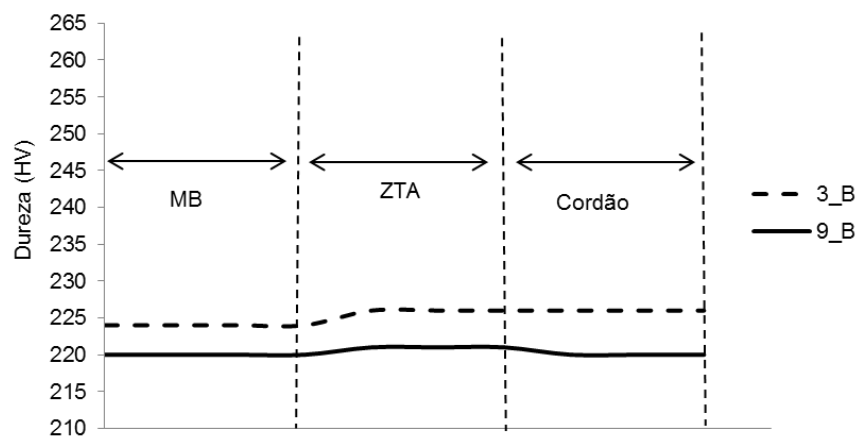


Figura 5.18- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes condições de arrefecimento, sendo a amostra 3 B arrefecida ao ar e a amostra 9 B no forno (a  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  com velocidade de arrefecimento de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ ).

Comparando a amostra 8 B com a 7 B, a nível da junta de soldadura obteve-se penetração total. A microestrutura da ZTA é idêntica á do MB, como se pode observar na Figura 5.19 a). Outra diferença em relação à amostra 7 B é que o cordão apresenta maior crescimento da fase alfa, e menor espaço entre as dendrites (Figura 5.19 b).



Observando a Figura 5.20 nota-se que a diminuição da velocidade de arrefecimento, como já aconteceu nas amostras anteriores, amaciou o cordão na amostra 8 B verificando-se uma dureza de  $248 \pm 6$  HV, sendo também mais uniforme que o cordão da 7 B. No entanto aumentou ligeiramente a dureza da ZTA, sendo a dureza da amostra 8 B de  $232 \pm 7$  HV. Novamente a variação do metal de adição para mais 5 % de Sn influenciou essencialmente ao nível do cordão, aumentando a sua dureza.

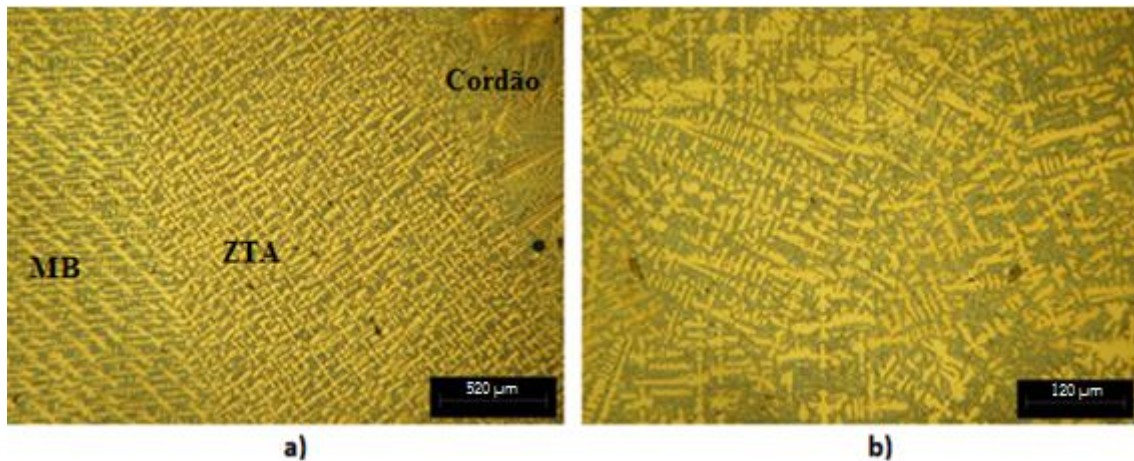


Figura 5.19– Microestrutura da amostra 8 B: a) transição MB/ZTA e ZTA/cordão; b) cordão

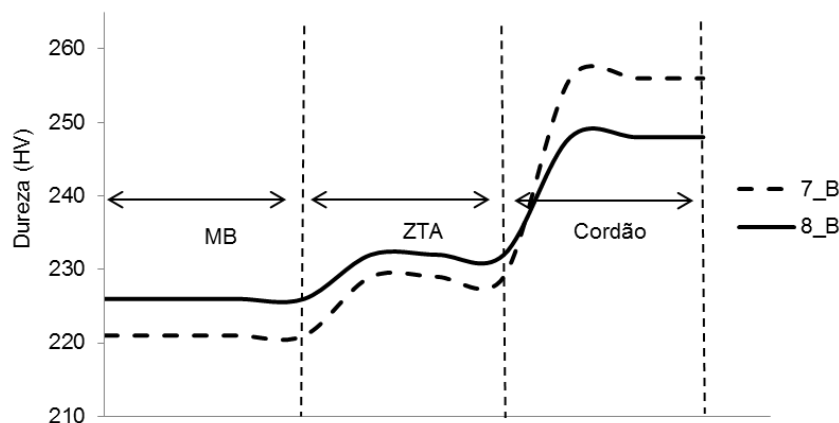


Figura 5.20- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes condições de arrefecimento, sendo a amostra 7 B arrefecida ao ar e a amostra 8 B no forno (a 400 °C com velocidade arrefecimento de 0,5 °C/min).

Na amostra 11 B, não se obteve penetração total e tal como na amostra 7 B deve-se tratar de um erro humano na soldadura dos provetes. O cordão apresenta algumas porosidades, sendo no geral de pequeno diâmetro, no entanto existe também de diâmetro elevado. Na Figura 5.21 a) pode-se observar a transição cordão/ZTA e ZTA/MB, e reparar que a ZTA apresenta uma microestrutura parecida com o MB, verificando-se um valor médio de dureza na ZTA igual ao do

MB, de  $226 \pm 4$  HV e  $226 \pm 7$  HV, respectivamente. Também são visíveis porosidades de elevado diâmetro.

Pela Figura 5.22, verifica-se que a diminuição da velocidade de arrefecimento na amostra 11 B, resultou na diminuição da dureza da ZTA diminuiu (cerca de 10 HV), tal como acontecido nas amostras 4 B e 9 B. Esperava-se também que o cordão amacia-se, com a diminuição da velocidade de arrefecimento, mas visualizando a Figura 5.14 b) e Figura 5.21 b) verifica-se menor crescimento da fase alfa resultando num aumento de dureza de 12 HV em relação à amostra 10 B. Isto pode ser justificado pela falta de penetração, provocado provavelmente por uma alteração nos parâmetros usados na operação de soldadura (ex. velocidade de soldadura elevada).

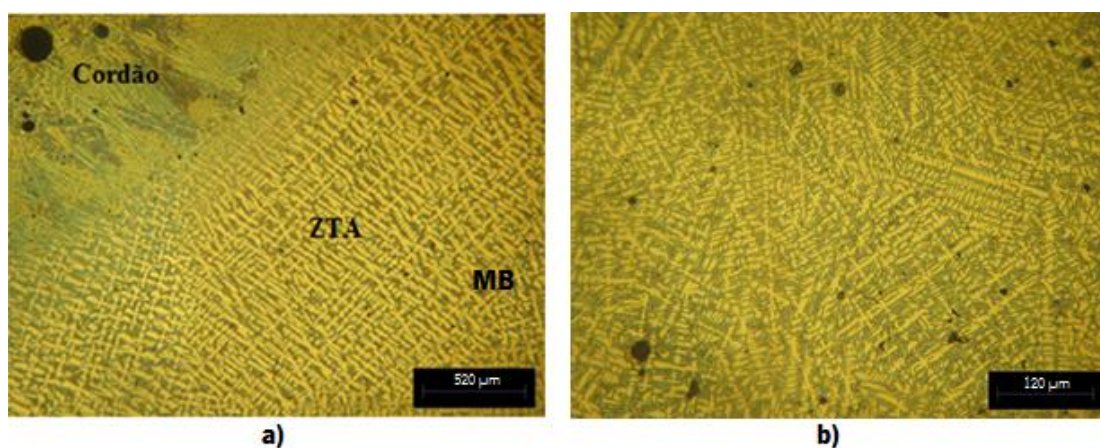


Figura 5.21- Microestrutura da amostra 11 B: a) transição cordão/ZTA e ZTA/MB da amostra 11 B na zona 3,4 e 5; b) cordão

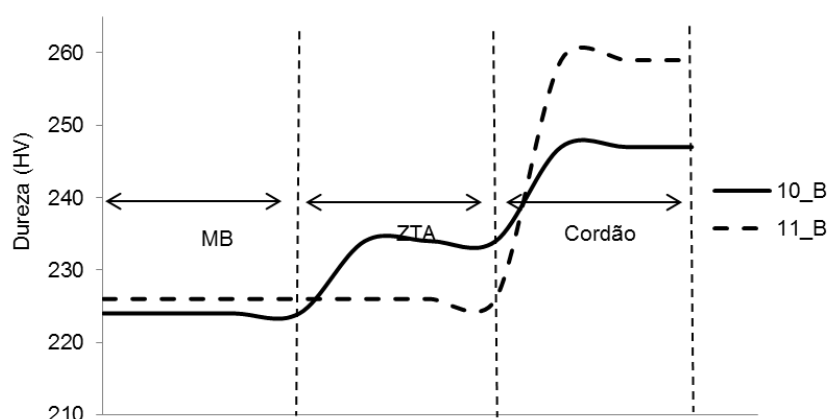


Figura 5.22- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes condições de arrefecimento, sendo a amostra 10 B arrefecida ao ar e a amostra 11 B no forno (a  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  com velocidade arrefecimento de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ ).

O arrefecimento mais lento, após soldadura, diminui as tensões residuais no material conforme parece sugerir a eliminação da fissuração após soldadura. O arrefecimento mais lento provocou uma homogeneização da microestrutura do cordão, ficando mais macio. Na ZTA também houve uma diminuição de dureza.

#### 5.2.4. Efeito da variação da intensidade

De forma a verificar-se o efeito da variação da intensidade de corrente, manteve-se os parâmetros de soldadura fixos das amostras anteriormente analisadas, alterando a intensidade para 90 A (Tabela 5.8).

Tabela 5.8: Parâmetros utilizados na verificação do efeito da intensidade de corrente

| Amostra | Temperatura de Pré-aquecimento (°C) | Intensidade (A) | Arrefecimento | Material de adição |
|---------|-------------------------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| 4 A     | 250                                 | 90              | 0,5 °C/min    | Metal base         |
| 6 A     | 250                                 | 90              | Ar            | Metal base         |
| 3 A     | 400                                 | 90              | Ar            | Metal base         |
| 9 A     | 400                                 | 90              | 0,5 °C/min    | Metal base         |
| 7 A     | 400                                 | 90              | Ar            | MB + 5% Sn         |
| 8 A     | 400                                 | 90              | 0,5 °C/min    | MB + 5% Sn         |
| 10 A    | 250                                 | 90              | Ar            | MB + 5% Sn         |
| 11 A    | 250                                 | 90              | 0,5 °C/min    | MB + 5% Sn         |

Na comparação da amostra 3 A com a amostra 3 B pode-se logo verificar uma diferença na junta de soldadura, na qual não se obteve penetração total ao contrário da amostra 3 B. Também se detetou maior número de porosidades no cordão, algumas com elevado diâmetro. A ZTA é mais heterogénea e nota-se uma maior alteração da microestrutura na transição MB/ZTA aumentando o espaçamento interdendrítico como se pode observar pela Figura 5.23. No cordão a microestrutura é semelhante.

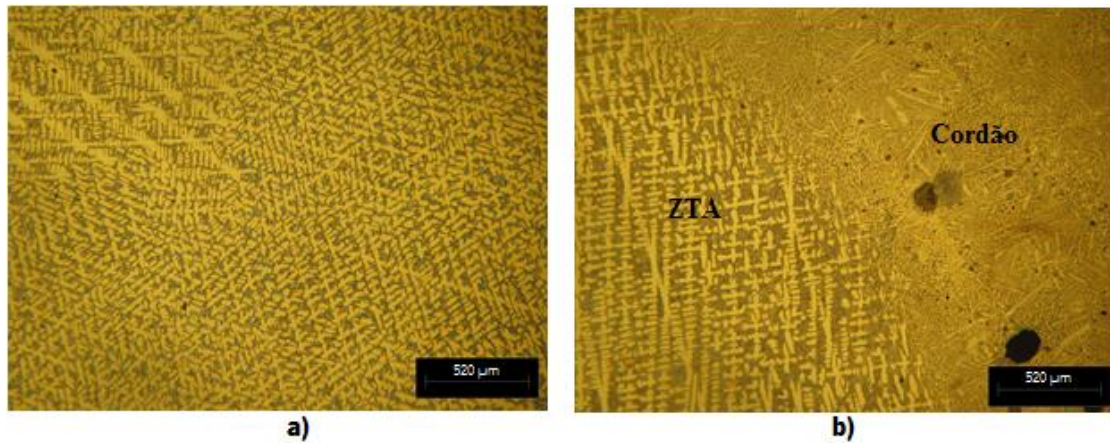


Figura 5.23- Microestrutura da amostra 3 A: a) MB; b) transição da ZTA para o cordão na zona 2 e 3

Pela Figura 5.24 não se verifica o esperado aumento de durezas, na ZTA o valor médio de durezas diminuiu cerca de 6 HV e no cordão verifica-se uma diminuição de 14 HV, o que sugere um cordão defeituoso dada a dureza apresentada. Observando a Tabela 5.9 constata-se que o desvio padrão do valor médio de durezas na ZTA da amostra 3 A é muito maior, o que justifica a variação mais acentuada da microestrutura da ZTA em relação á amostra 3 B. A variação de durezas no MB, apesar de estar superior ao desvio padrão da amostra do lingote ( 10 HV), considera-se como erro na medição, dado que a nível microestrutural apresenta-se semelhante.

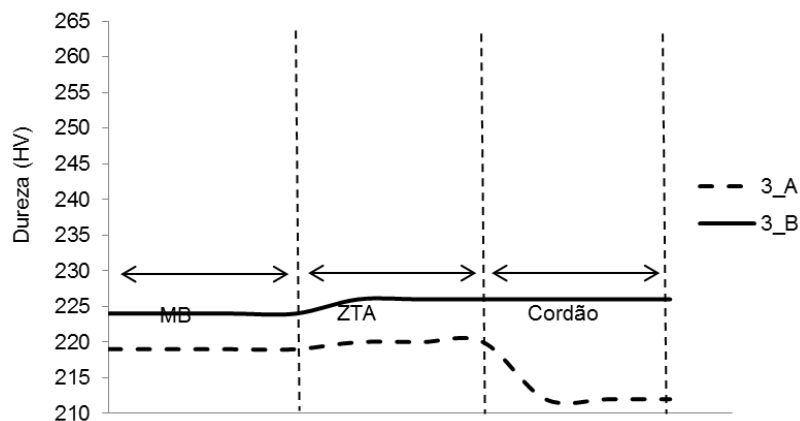


Figura 5.24 - Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidade de corrente, sendo a amostra 3 A soldada a 90 A e a 3 B a 110 A.

Tabela 5.9- Valores médios de durezas das amostras 3 A e 3 B.

|             | Zona   | Durezas (HV) |    |
|-------------|--------|--------------|----|
| Amostra 3A  | MB     | 16           |    |
|             | ZTA    | 220          | 19 |
|             | Cordão | 212          | 8  |
| Amostra 3 B | MB     | 224          | 1  |
|             | ZTA    |              | 5  |
|             | Cordão | 226          | 7  |

Na amostra 6 A, tal como na amostra 6 B, não se obteve penetração total na junta de soldadura, no entanto apresenta uma fissura ao longo do cordão e uma enorme porosidade central, para além de outras mais pequenas ao longo do cordão. A transição MB/ZTA é semelhante ao encontrado em 6 B, havendo zonas com maior acentuação na estrutura grosseira da ZTA, como por exemplo na zona sem penetração ilustrado na Figura 5.25, na qual também é visível a enorme porosidade e a fissura. Também se notou que na parte superior do cordão, a microestrutura se encontra mais refinada em relação á zona central do cordão.

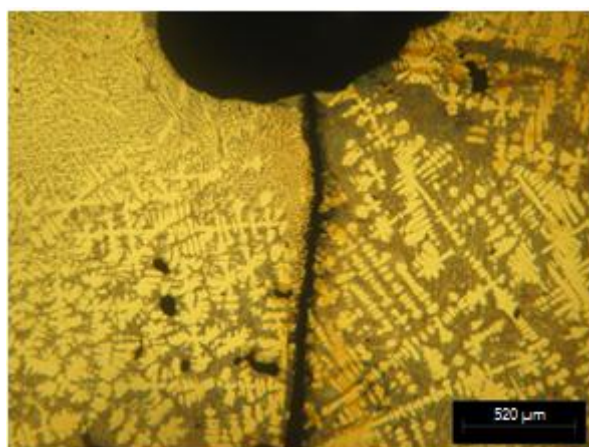


Figura 5.25- Microestrutura da amostra 6 A na zona sem penetração.

Como anteriormente visto, na variação da intensidade entre as amostras 3 A e 3 B, a dureza entre a amostra 6 A e 6 B em geral diminuiu (Figura 5.26), o que também não era esperado visto que, na ZTA existem zonas com maior espaçamento interdendrítico e o cordão apresenta maior refinação na microestrutura. Apesar de haver maior alteração da microestrutura na ZTA e o cordão conter mais porosidades, o desvio padrão do valor médio das durezas verificou-se mais acentuado na amostra 6 B. Na ZTA, a variação, pode-se ser explicada pelo facto de a microestrutura ser mais grosseira, podendo haver mais indentações na zona branca.

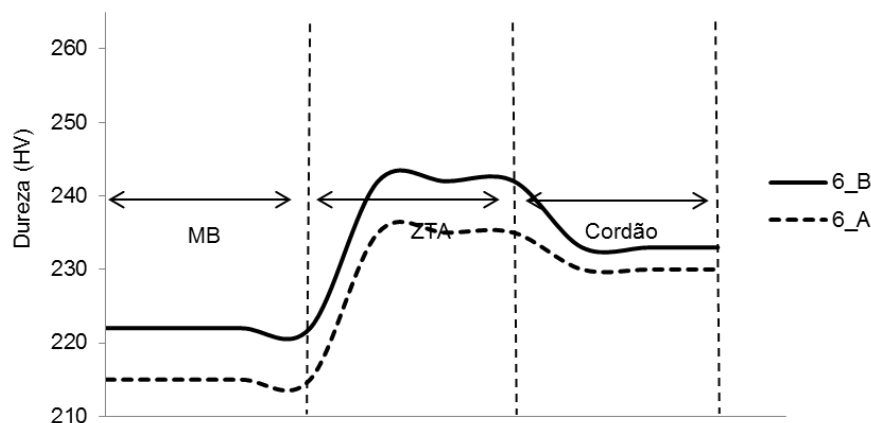


Figura 5.26- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 6 A soldada a 90 A e a 6 B a 110 A.

Tabela 5.10- Valores médios de dureza das amostras 6 A e 6 B.

|             | Zona   | Durezas (HV) |    |
|-------------|--------|--------------|----|
| Amostra 6 A | MB     | 215          | 13 |
|             | ZTA    |              | 27 |
|             | Cordão | 230          | 7  |
| Amostra 6 B | MB     |              | 2  |
|             | ZTA    |              | 32 |
|             | Cordão | 233          | 11 |

Na amostra 4 A, a variação da intensidade de corrente provocou o aumento do espaçamento interdendrítico da microestrutura da ZTA (Figura 5.27). Ao contrário das amostras 3 A e 6 A, obteve-se penetração total. No cordão, a microestrutura encontrada na amostra 4 A é semelhante à microestrutura da amostra 4 B. Na Figura 5.28 verifica-se, o aumento de dureza no cordão e na ZTA, estando de acordo com o descrito na microestrutura. Pela Tabela 5.11 verifica-se que o desvio padrão no valor médio de dureza da ZTA da amostra 4 B é maior que na amostra 4 A, no entanto não é um número significativo (diferença de 6 HV). A diferença do valor médio da dureza do MB justifica-se, pela única indentação (somente uma foi aproveitada) estar inserida numa zona com maior constituinte eutetóide.



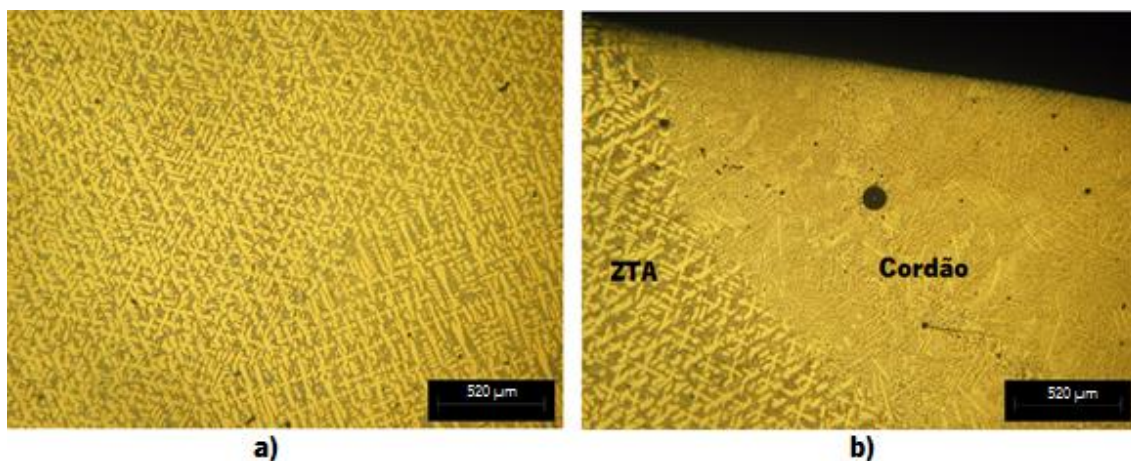


Figura 5.27- Microestrutura da amostra 4 A: a) MB na zona 1; b) transição ZTA/cordão na Zona 2 e 3.

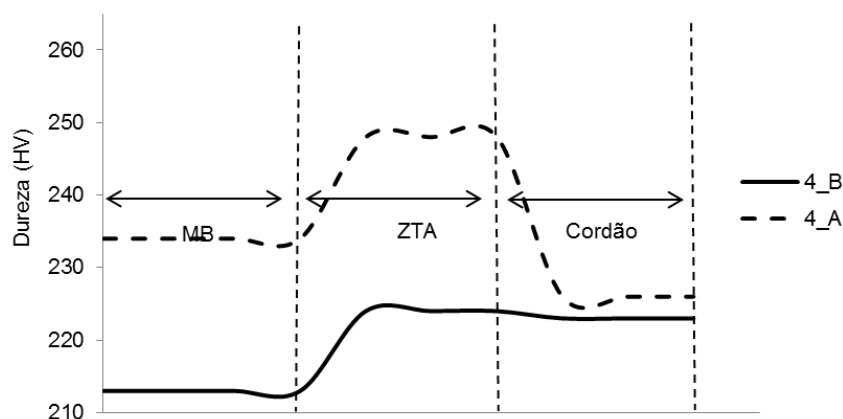


Figura 5.28- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 4 A soldada a 90 A e a 4 B a 110 A.

Tabela 5.11- Valores médios de dureza das amostras 4 A e 4 B.

|                    | Zona   | Durezas |
|--------------------|--------|---------|
| <b>Amostra 4 A</b> | MB     | 234 0   |
|                    | ZTA    | 9       |
|                    | Cordão | 5       |
| <b>Amostra 4 B</b> | MB     | 9       |
|                    | ZTA    |         |
|                    | Cordão | 6       |

Na amostra 9 A a variação da intensidade de corrente resultou numa microestrutura mais heterogénea na ZTA. Como na amostra 3 A e 6 A não se obteve penetração total. No cordão existe elevado número de porosidades, mas em menor número que a amostra 9 B, que como visto anteriormente supõe-se que foi soldado com pouco árgon, de forma que a nível do cordão

não serão feitas comparações. Na Figura 5.29 encontra-se a transição do cordão/ZTA e ZTA/MB onde se verifica o grande espaçamento interdendrítico. Na Figura 5.30 confirma-se o aumento da dureza na ZTA, apresentando um valor de  $245 \pm 22$  HV, enquanto a amostra 9 B apresenta um valor de  $221 \pm 16$  HV, sendo também mais uniforme.

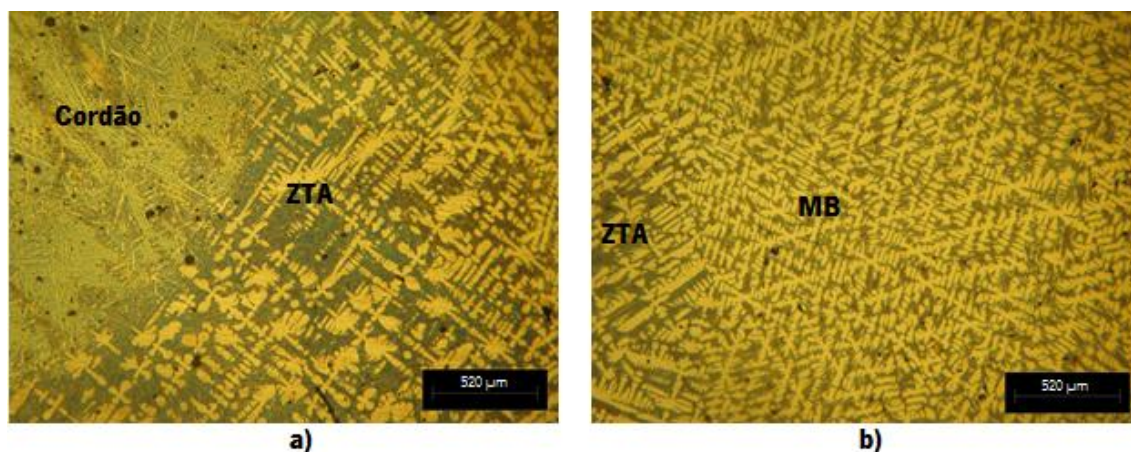


Figura 5.29- Microestrutura da amostra 9 A: a) transição cordão/ZTA na zona 3 e 4; b) transição ZTA/MB na zona 4 e 5.

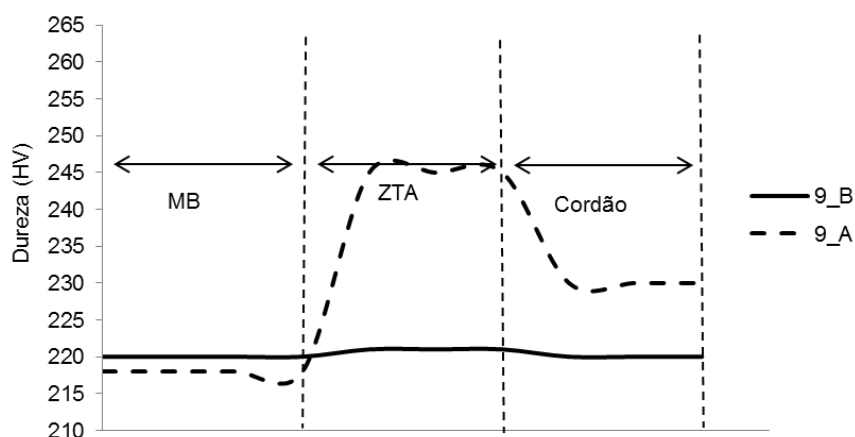


Figura 5.30- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 9 A soldada a 90 A e a 9 B a 110 A.

O efeito da variação da intensidade de corrente entre a amostra 7 B e 7 A, não será considerada, devido ao facto da amostra 7 A ter sido soldada sem quase nenhum árgon ou mesmo nenhum, refletindo-se numa junta de soldadura degradada.

A variação da intensidade de corrente na amostra 8 A, provocou o aumento do espaçamento interdendrítico na microestrutura da ZTA, que aumenta, à medida que se afasta da parte superior. Ao contrário da amostra 8 B não se obteve penetração total. Na Figura 5.31



pode-se observar o MB e a transição do cordão/ZTA. Na Figura 5.32 consta-se que o aumento de dureza na ZTA é ligeiro e que também existe um aumento da dureza no cordão, sendo este último mais significativo. Na Tabela 5.12 pode-se reparar que, apesar do aumento de dureza na ZTA não ser elevado, apresenta um desvio padrão no valor médio da dureza muito maior, justificando a variação do espaçamento interdendrítico da zona superior da ZTA até à zona sem penetração. Também se verifica que o cordão é menos uniforme e mais duro, justificado pelo menor crescimento das dendrites.

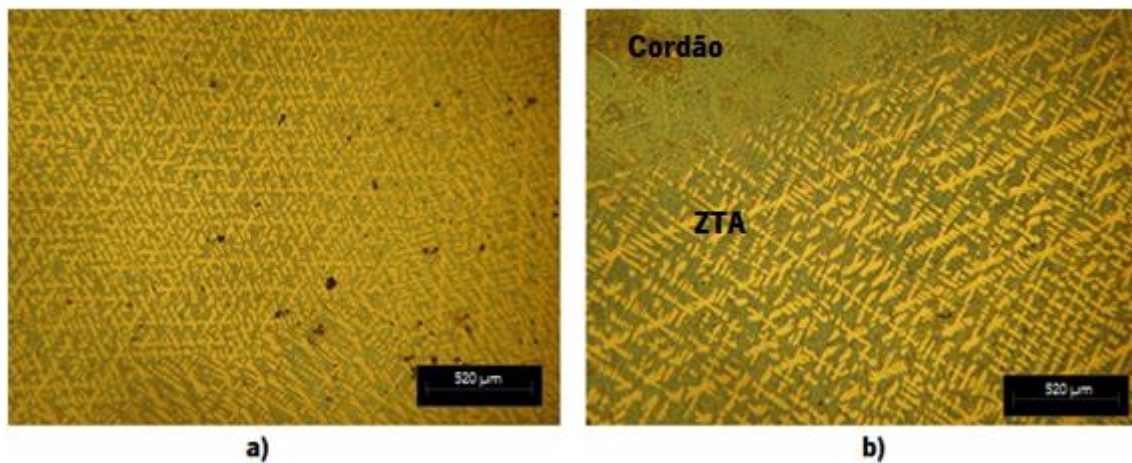


Figura 5.31- Microestrutura da amostra 8 A: a) MB na zona 5; b) transição cordão/ZTA na zona 3 e 4.

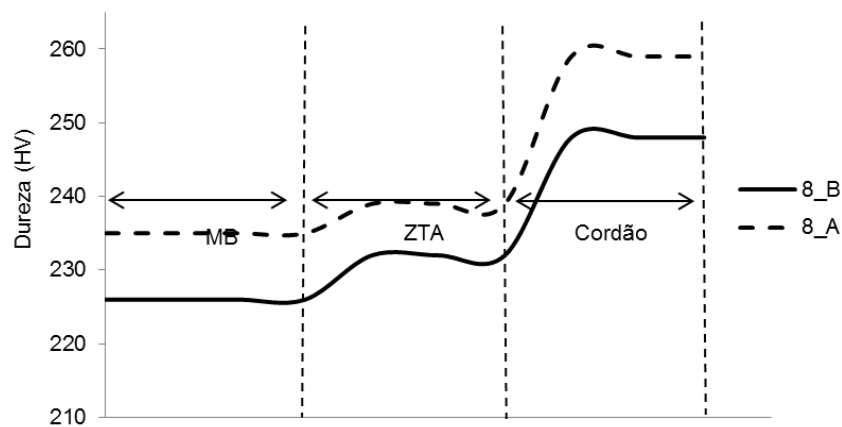


Figura 5.32- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 8 A soldada a 90 A e a 8 B a 110 A.

Tabela 5.12- Valores médios de dureza das amostras 8 A e 8 B.

|                    | Zona   | Durezas |
|--------------------|--------|---------|
| <b>Amostra 8 A</b> | MB     | 235     |
|                    | ZTA    |         |
|                    | Cordão |         |
| <b>Amostra 8 B</b> | MB     |         |
|                    | ZTA    |         |
|                    | Cordão | 6       |

Nas amostras 10 A e 11 A, não se obteve penetração total e ambas fissuraram ao longo do cordão. Apresentam inúmeras porosidades, muitas delas de diâmetro elevado na zona do cordão, como se pode verificar pela Figura 5.33.

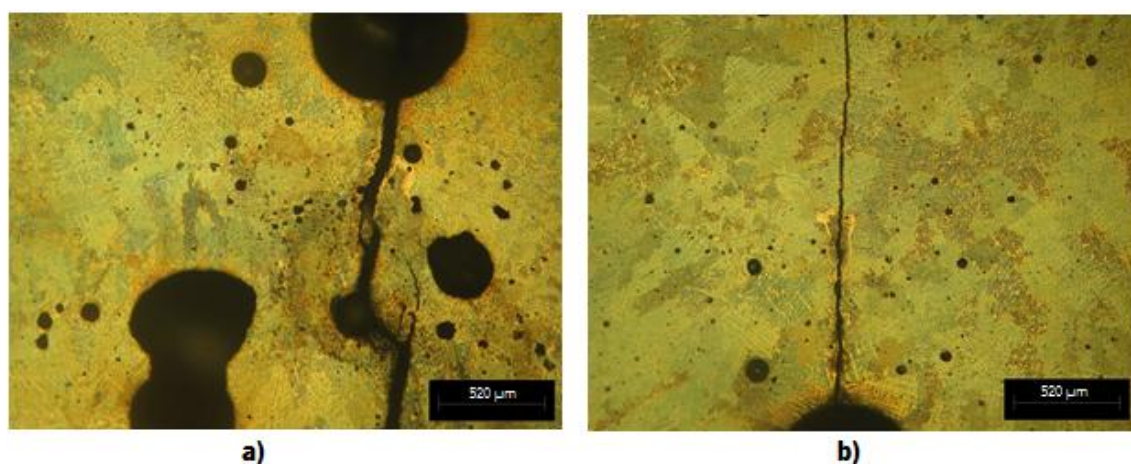


Figura 5.33- Microestrutura da amostra 10 A e 11 A: a) porosidades e fissuração no cordão da amostra 10 A; b) porosidades e fissuração da amostra 11 A.

Na amostra 10 A na transição do MB/ZTA a microestrutura pouco se alterou, exceto na zona sem penetração, em que aumento o espaçamento interdendrítico. é maior do lado direito da fissura (Figura 5.34). Comparando com a amostra 10 A e a 10 B, pela Figura 5.35 pode-se constatar que a dureza na ZTA estranhamente diminuiu e que a dureza no cordão no cordão, como esperado, aumentou. Na Tabela 5.13 confirma-se a não uniformidade do cordão e o aumento da dureza, e também se verifica que, apesar da ZTA apresentar um valor médio de dureza menor, apresenta um desvio padrão maior.

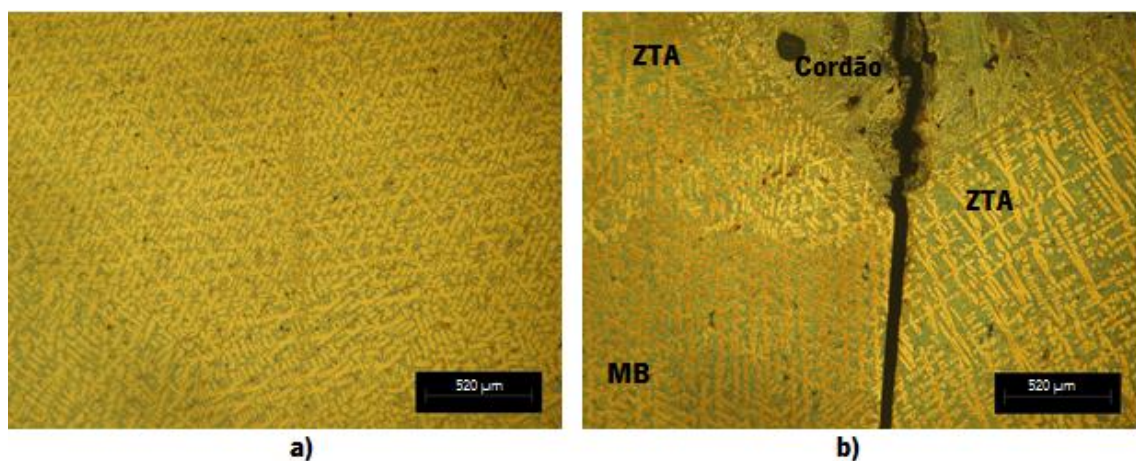


Figura 5.34- Microestrutura da amostra 10 A: a) MB; b) transição MB/ZTA e cordão/ZTA na zona sem penetração.

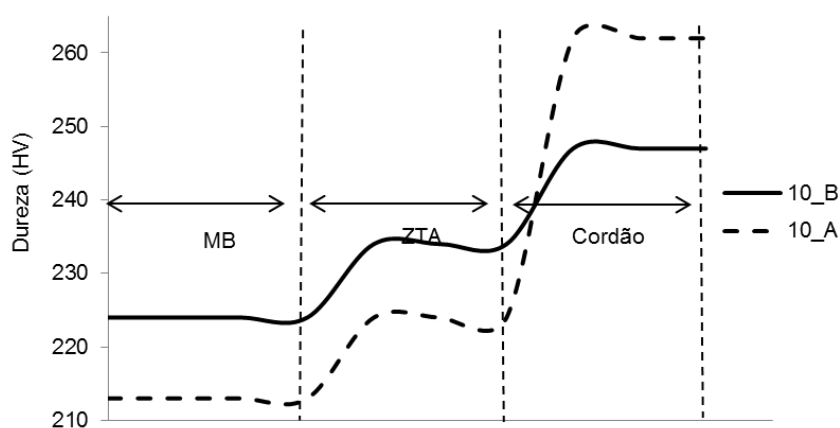


Figura 5.35- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 10 A soldada a 90 A e a 10 B a 110 A.

Tabela 5.13- Valores médios de dureza das amostras 10 A e 11 B.

|              | Zona   | Durezas |
|--------------|--------|---------|
| Amostra 10 A | MB     | 213     |
|              | ZTA    |         |
|              | Cordão |         |
| Amostra 10 B | MB     |         |
|              | ZTA    |         |
|              | Cordão |         |

Na amostra 11 A na transição MB/ZTA a alteração microestrutural é mínima em algumas zonas, tal como visto na amostra 10 A, como se pode observar pela Figura 5.36 e comprovado pela evolução do valor médio de dureza, linha a traço interrompido da Figura 5.37 (linha 11\_A).

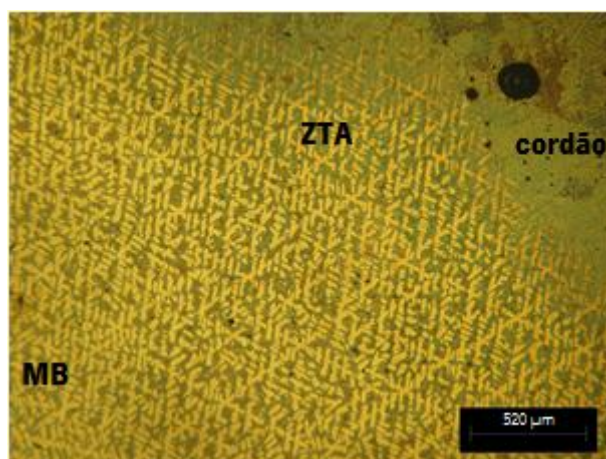


Figura 5.36- Transição do MB/ZTA e ZTA/cordão na microestrutura da amostra 11 A.

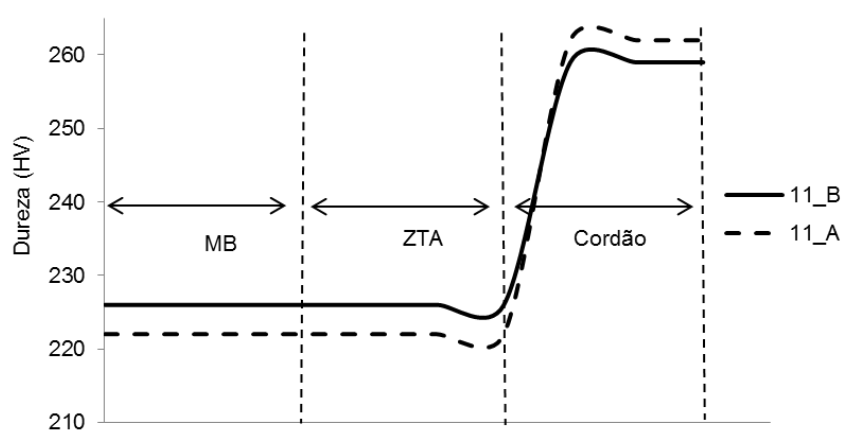


Figura 5.37- Evolução da dureza na junta de soldadura para diferentes intensidades de corrente, sendo a amostra 11 A soldada a 90 A e a 11 B a 110 A.

Pela tabela pode-se constatar que apesar do valor médio da dureza da ZTA ser igual ao do MB, apresenta um desvio padrão elevado, o que quer dizer apresenta uma microestrutura não uniforme, apesar de haver zonas em que transição MB/ZTA não seja acentuada.

Tabela 5.14- Valores médios de dureza das amostras 10 A e 11 B.

|              | Zona   | Durezas |
|--------------|--------|---------|
| Amostra 11 A | MB     | 222     |
|              | ZTA    |         |
|              | Cordão |         |
| Amostra 11 B | MB     |         |
|              | ZTA    |         |
|              | Cordão | 14      |

A diminuição da intensidade de corrente de soldadura provocou a formação de uma microestrutura mais heterogénea, no interior da ZTA, e de forma geral mais grosseira. A dureza média na ZTA é mais elevada para a soldadura a 90 A.

Em termos de defeitos físicos de soldadura há um aumento da fração volúmica e tamanho das porosidades no cordão para a soldadura a 90 A. Estes defeitos agravam-se com a adição de estanho ao material de adição. A penetração aumenta diretamente com a intensidade de soldadura.



## 6. Conclusão

No decorrer deste estudo verificou-se que existem algumas divergências na informação bibliográfica referente aos bronzes, nomeadamente para teores elevados de estanho, desde o diagrama de fases até aos procedimentos de soldadura.

A bibliografia existente para os bronzes, relativamente à soldadura, é escassa quando comparada com a dos aços. Na manufatura, a soldadura só é, geralmente, efetuada em bronzes obtidos por trabalho mecânico, exceto nas reparações de ligas fundidas. Assim para os bronzes de alto teor de estanho não existem normas nem procedimentos de soldadura. Por outro lado, a pouca informação existente, para a soldadura de bronzes de alto teor de estanho não é unânime quanto aos parâmetros a usar na prevenção da fissuração a quente. O teor elevado de estanho aumenta a resistência mecânica do material tornando-o mais sensível à fissuração a quente.

Dentro dos processos aconselhados para a soldadura do bronze, a técnica TIG e a soldadura a laser parecem os melhores para a soldadura de bronzes de sinos, porque pode-se controlar a composição química do material de adição, que neste caso deve ser o mais aproximado possível do metal base. Deste modo dentro das técnicas disponíveis no Departamento de Engenharia Mecânica, TIG e MIG, optou-se pela técnica TIG.

No fabrico do material de adição, a moldação em areia de silicato de sódio/CO<sub>2</sub> não apresentou resultados satisfatórios, tendo sido usado a fundição em moldação permanente para a obtenção do material de adição para a soldadura. No fabrico das varetas comprovou-se a oxidação do Sn, Pb e do Zn como descrito na bibliografia. Assim para tentar controlar a oxidação de estanho, foram também fabricadas varetas com adição de 5 % de estanho em relação ao metal base.

A seleção dos parâmetros de soldadura foi feita a partir da informação recolhida na literatura. Optou-se por duas temperaturas de pré-aquecimento, uma a 250 °C, que respeita o procedimento descrito pela AWS para bronzes fosfóricos, e outra a 400 °C de forma a verificar o efeito do aumento dessa temperatura. Apesar de alguns autores defenderem que não é necessário o pré-aquecimento para teores mais altos de estanho, devido à condutividade térmica ser inferior à dos bronzes com menor teor de estanho, outros defendem que ajuda a minimizar a

magnitude das tensões residuais juntamente com o arrefecimento lento após a soldadura. A intensidade de corrente selecionada foi de 90 e 110 A dado que a 100 A já se verificavam boas condições de soldadura.

Em relação aos resultados obtidos na soldadura das chapas de bronze pode-se concluir que:

- i. O material de adição fabricado a partir do metal base, apesar da menor percentagem de estanho (menos 2,5 %), apresenta bons resultados garantindo ainda assim um aumento de dureza do cordão relativamente ao MB;
- ii. O material de adição com a adição de Sn (mais 2,5 %) provoca um aumento elevado da dureza no cordão (entre 35 a 45 HV em relação ao MB);
- iii. A diminuição da intensidade para 90 A provoca falta de penetração, um aumento de defeitos de soldadura (aumenta a fração volúmica de porosidades) e o aparecimento de fissuração a quente. Há também, um aumento excessivo de dureza no cordão. A microestrutura da ZTA torna-se mais heterogénea, que resulta num aumento da dureza média nessa zona;
- iv. O arrefecimento mais lento, após soldadura, diminui as tensões residuais no material conforme parece sugerir a eliminação da fissuração após soldadura. Provoca uma homogeneização da microestrutura do cordão, ficando este mais macio. Na ZTA há, também, uma diminuição de dureza.
- v. A velocidade de soldadura pode-se sobrepor ao efeito da temperatura de pré-aquecimento, e influenciar diretamente a entrega térmica. A maior velocidade provoca falta de fusão, e o aumento de dureza no cordão. A menor entrega térmica, provocada pela maior velocidade de soldadura, resulta numa ZTA com microestrutura mais heterogénea.

Em resumo conclui-se que a soldadura com 110 A facilita a operação de soldadura evitando a falta de penetração, a formação de porosidades e a fissuração a quente. O pré-aquecimento parece evitar o efeito de fissuração a quente embora os resultados não sejam conclusivos relativamente à temperatura a usar. Da mesma forma a diminuição da velocidade de arrefecimento parece diminuir a tendência à fissuração após soldadura. A composição química do material de adição deve ser o mais próximo possível do metal base.



## 7. Trabalhos futuros

Neste estudo o efeito da temperatura de pré-aquecimento foi inconclusivo quanto à temperatura a usar, de forma que, em trabalhos futuros deve-se testar temperaturas de pré-aquecimento inferiores, como por exemplo 150- 177 °C (limite inferior para bronzes fosforosos segundo a literatura) ou a soldadura sem pré-aquecimento.

A análise de resultados na soldadura manual é sempre influenciada pelo procedimento de soldadura. Para evitar este efeito deveria fazer-se um estudo usando a soldadura automática para melhor diferenciação do efeito de cada variável de soldadura sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas na zona soldada.

Quanto menor a entrega térmica mais rápido é o arrefecimento, resultando numa microestrutura mais refinada no cordão. Na ZTA a menor entrega térmica parece promover o aumento do espaçamento interdendrítico, e o aumento do constituinte eutetóide. Seria então interessante analisar em pormenor a microestrutura desse constituinte através do microscópio eletrónico, podendo assim, explicar a heterogeneidade provocada pela menor entrega térmica e também explicar o amaciamento provocado na ZTA quando se diminui a velocidade de arrefecimento após soldadura.

Também seria interessante a realização de testes com soldadura multipasses, e em cada camada usar a técnica *hot peening*, de modo a reduzir as tensões e a probabilidade de fissuração do cordão.

## Referências

- [1] (1980). *Introdução à tecnologia dos processos de soldadura*, Universidade do Minho
- [2] AFROX (2007) –Welding consumables section 11- Copper. Product Reference Manual. AFROX
- [3] *Ancient Bells from Foreign Countries*. Consultado em 17/11/2011, disponível em <http://www.china.org.cn/english/features/FbiCh/78460.htm>
- [4] Article 70. Copper-Tin alloy: the bronzes, consultado em 10/12/2011, disponível em <http://www.keytometals.com/Article70.htm>
- [5] A restoration of bells. Consultado em 7/12/2011, disponível em [http://www.dennis-greenwood.co.uk/restoration/restoration\\_8.html](http://www.dennis-greenwood.co.uk/restoration/restoration_8.html)
- [6] ASM Handbook (1992). *Alloy phase diagrams Vol. 3*, ASM International
- [7] ASM Handbook, (1988). *Casting*, Vol. 15, ASM international
- [8] ASM Handbook (1990). *Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials Vol. 2*, ASM International
- [9] ASM Handbook, (1985) *Metallography and Microstructures*, Vol. 9, ASM international
- [10] ASM Handbook (1993). *Welding, brazing and soldering, Vol. 6*. ASM International
- [11] Barbosa, Cássio. *Apostila sobre o cobre*. Consultado em 20/01/2012, disponível em [www.infomet.com.br](http://www.infomet.com.br)
- [12] Bian Xiufang, *et al.* *Correlation between viscosity of molten Cu-Sn alloys and phase diagram*. Physica B 387 (2007) 1-5
- [13] CDA publication n° 94,(1992). *Equilibrium diagrams – Selected copper alloy diagrams illustrating the major types of phase transformation*. Copper development association
- [14] Cary, B., Howard. ,(1979). *Modern welding technology*. Prentice Hall
- [15] Joseph, Günter (1999). *Copper: It´s Trade, Manufactured, use and environmental status*. Eds. Konrad J.A. Kunding. ASM international
- [16] Fraunhofer LBF. *Bronze Fatigue*. Consultado em 10/12/2012, disponível em <http://www.russianbells.com/founding/bronzefatigue.html>
- [17] Funderburk, R. Scott, (1999). *Welding Innovation Vol. XVI, N°1. Fundamentals of preheat*. James F. Lincoln Arc Welding Foundation
- [18] Funderburk, R. Scott, (1998). *Welding Innovation Vol. XV, N°2. Postweld heat treatment*. F. Lincoln Arc Welding Foundation

- [19] Funderburk, R. Scott, (1997). *Welding Innovation Vol. XIV, N°2. A look at heat input*. James F. Lincoln Arc Welding Foundation
- [20] Granjon, H. (1993). *Bases Metalúrgicas da soldadura*. Traduzido por Lopes D. Eduardo. Publicações da soldadura Autogénea
- [21] History of Bells . Consultado em 17/11/2011, disponível em <http://www.essortment.com/history-bells-21062.html>
- [22] Houldcroft P., Jonh R. (1989). *Welding and cutting: a guide to fusion welding and associated cutting process*. Industrial Press Inc, New Yor
- [23] Jia-Xi Hu *et. al.*, (2010). *Journal of alloys and compounds. Microstructure characteristics and acoustic properties of laser repaired Chinese bronze bells 2300 years ago*. Elsevier pp, 953-956
- [24] Kita-shinagawa, shinagawa-Ku. (2011). *Arc Welding of Nonferrous metals.*, Kobe Steel, Fourth edition
- [25] Limeira, D.A., ( 1995). *Histórias sobre sinos*. Eds.Tecnosino Consultado em 17/11/2011, disponível em <http://www.tecnosino.com/historia/>
- [26] Linnert, G. E. (3ª Ed.) (1965). Temperature changes in welding. Welding Metallurgy Vol. 1. AWS, New York, 176-201
- [27] Meneghetti G., Rossi B.(2010). *Engineering Structures. An analytical model based on lumped parameters for dynamic analysis of church bells*. Elsivier, pp 3363-3376
- [28] Monograph series on alloy phase diagrams. *Phase diagrams of binary copper alloys*. Eds. P.R. Subramanian, D.J. chakrabartu, D.E. Laughlin. ASM international
- [29] Putnam's G. P., (1970). *Bells and their music*. Number: 76-77762 Eds. GPSS, New York Consultado em 17/11/2011, disponível em <https://www.msu.edu/~carillon/batmbbook/index.htm>
- [30] Rupp A. (2006). *Ringing bells- State of the art in the durability evaluation of church bells*. LAVEK
- [31] R. W. M. Clouston, The Welding of Cracked Bells, Studies in Conservation, Vol. 2, No. 4 (Oct., 1956), pp. 170-175. International institute for conservation of historic and artistic works
- [32] Scoot, A. David (1991). *Metallography and microstructure of ancient and historic metals*. Singapore: The Getty conservation institute in association with Archtype books
- [33] Seabra, Antera Valeriana. (2º Edição). (1995). *Metalurgia Geral, Vol. 2, Lisboa: LNEC*

- [34] Soundweld. (2008). *Bell repair*. Consultado em, 12/12/2012, disponível em <http://www.soundweld.co.uk>
- [35] ST Laurence Bell fund.*Problems*. Consultado em 7/12/2011, disponível em <http://www.alvechurchbells.org.uk/problems.html>
- [36] wayman Michael L., Bringas E. John (1993). *The Metals Red Book: Nonferrous Metals Vol 2*. Cast1 Publishing Inc
- [37] Welding Handbook (8ª Eds.) (1996). Materials and applications part 1, Vol. 3. American Welding Society
- [38] NP-371: 1964 – Cobre. Terminologia e definições.
- [39] NP-1206: 1976 - Ligas de cobre. Bronze de estanho para fundição F-Cu-Sn 10. Características.
- [40] NP-1210: 1976 - Ligas de cobre. Bronze de estanho com chumbo, para fundição F-Cu-Sn 10 Pb 10. Características.
- [41] ISO R85 - Bend Test for Steel

## **A. ANEXOS**

Anexo 1 - Propriedades das ligas de bronze

Anexo 2 - Desenho técnico da coquilha

Anexo 3 - Microestruturas das amostras

Anexo 4 - Durezas das amostras

## **Anexo 1**

Anexo 1 - Propriedades das ligas de bronze

Neste anexo são apresentadas tabelas com a composição química em peso, as propriedades mecânicas, aplicações e método de fabrico de ligas comercializadas de bronze, segundo a norma portuguesa e segundo a ASM.

Tabela A.1- Propriedades de ligas de bronze fundidas segundo a ASM.

| Designação<br>UNS | Composição nominal %         | Propriedades<br>mecânicas       |                                |                               |                | Maquinabilidade<br>% |
|-------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------|
|                   |                              | Tensão<br>de<br>rutura<br>(Mpa) | Tensão de<br>cedência<br>(Mpa) | Alongamento<br>em 50 mm,<br>% | Dureza<br>(HB) |                      |
| C90200            | 93 Cu, 7 Sn                  | 262                             | 110                            | 30                            | 70             | 20                   |
| C90300            | 88 Cu, 8 Sn, 4 Zn            | 310                             | 145                            | 30                            | 70             | 30                   |
| C90500            | 88 Cu, 10 Sn, 2 Zn           | 310                             | 152                            | 25                            | 75             | 30                   |
| C90700            | 89 Cu, 11 Sn                 | 303                             | 152                            | 20                            | 80             | 20                   |
| C90800<br>C90900  | 87 Cu, 12 Sn<br>87 Cu, 13 Sn | 276                             | 138                            | 15                            | 90             | 20                   |
| C91000            | 85 Cu, 14 Sn, 1 Zn           | 221                             | 172                            | 2                             | 105            | 20                   |
| C91100            | 84 Cu, 16 Sn                 | 241                             | 172                            | 2                             | 135*           | 10                   |
| C91300            | 81 Cu, 19 Sn                 | 241                             | 207                            | 0.5                           | 170            | 10                   |
| C91600            | 88 Cu, 10.5 Sn, 1.5 Ni       | 303                             | 152                            | 16                            | 85             | 20                   |
| C91700            | 86.5 Cu, 12 Sn, 1.5 Ni       | 303                             | 152                            | 16                            | 85             | 20                   |
| C92600            | 87 Cu, 10 Sn, 1 Pb, 2 Zn     | 303                             | 138                            | 30                            | 70             | 40                   |
| C92700            | 88 Cu, 10 Sn, 2 Pb           | 290                             | 145                            | 20                            | 77             | 45                   |
| C92800            | 79 Cu, 16 Sn, 5 Pb           | 276                             | 207                            | 1                             |                | 70                   |
| C92900            | 84 Cu, 10 Sn, 2.5 Pb, 3.5 Ni | 324                             | 179                            | 20                            | 80             | 40                   |

Em seguida apresentam-se as aplicações típicas deste tipo de ligas:

- i. C90200: Rolamentos e mancais
- ii. C90300 e C90500: Rolamentos, mancais, bombas de impulsão, anéis para pistões, componentes de válvulas, componentes de tubagens, engrenagens

- iii. C90700: Engrenagens, rolamentos e mancais.
- iv. C90800 e C90900: Rolamentos e mancais
- v. C91000: Anéis para pistões e rolamentos
- vi. C91100: Anéis para pistões, rolamentos, mancais, placas
- vii. C91300: Anéis para pistões, rolamentos, mancais, sinos, placas
- viii. C91600 e C91700: Engrenagens
- ix. C92600: rolamentos, mancais, bombas de impulsão, anéis para pistões, componentes de válvulas, componentes de tubagens, engrenagens
- x. C92700: rolamentos, mancais, bombas de impulsão, anéis para pistões, componentes de válvulas, componentes de tubagens, engrenagens
- xi. C92800: Anéis para pistões
- xii. C92900: Engrenagens, pratos de desgaste, Cames, guias.

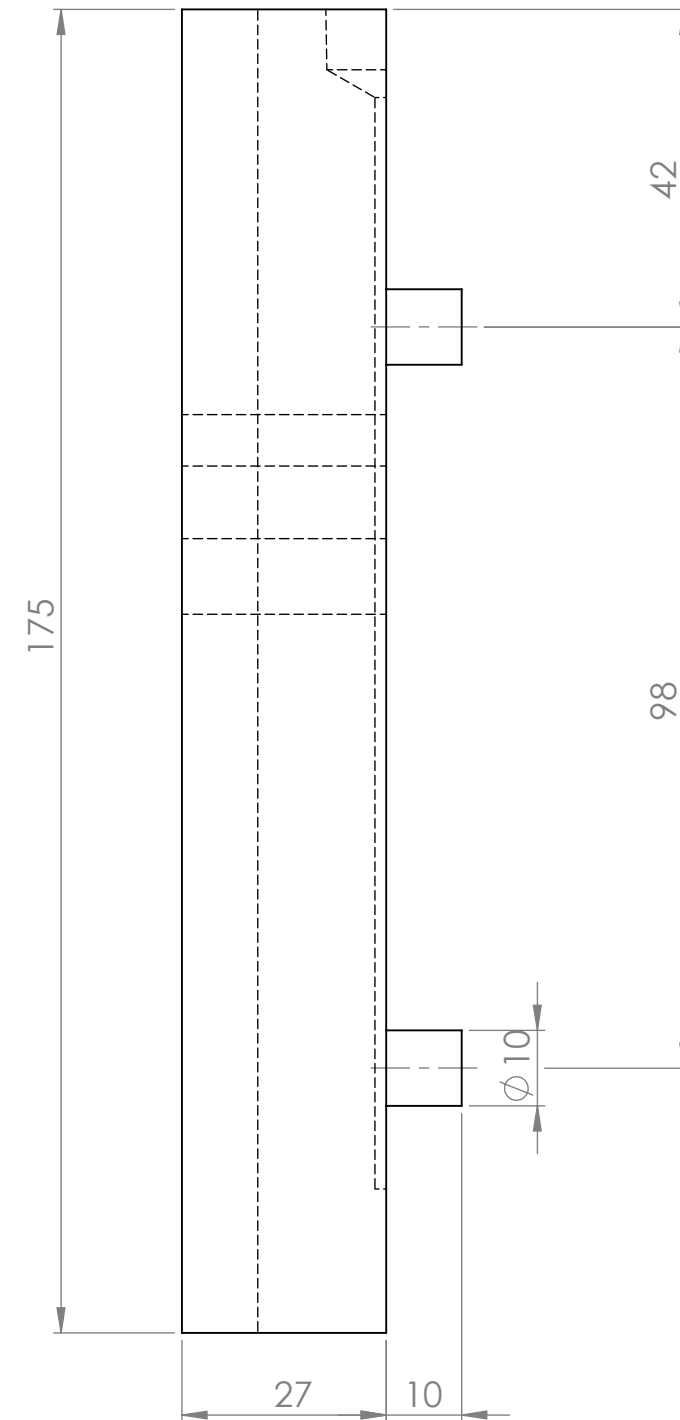
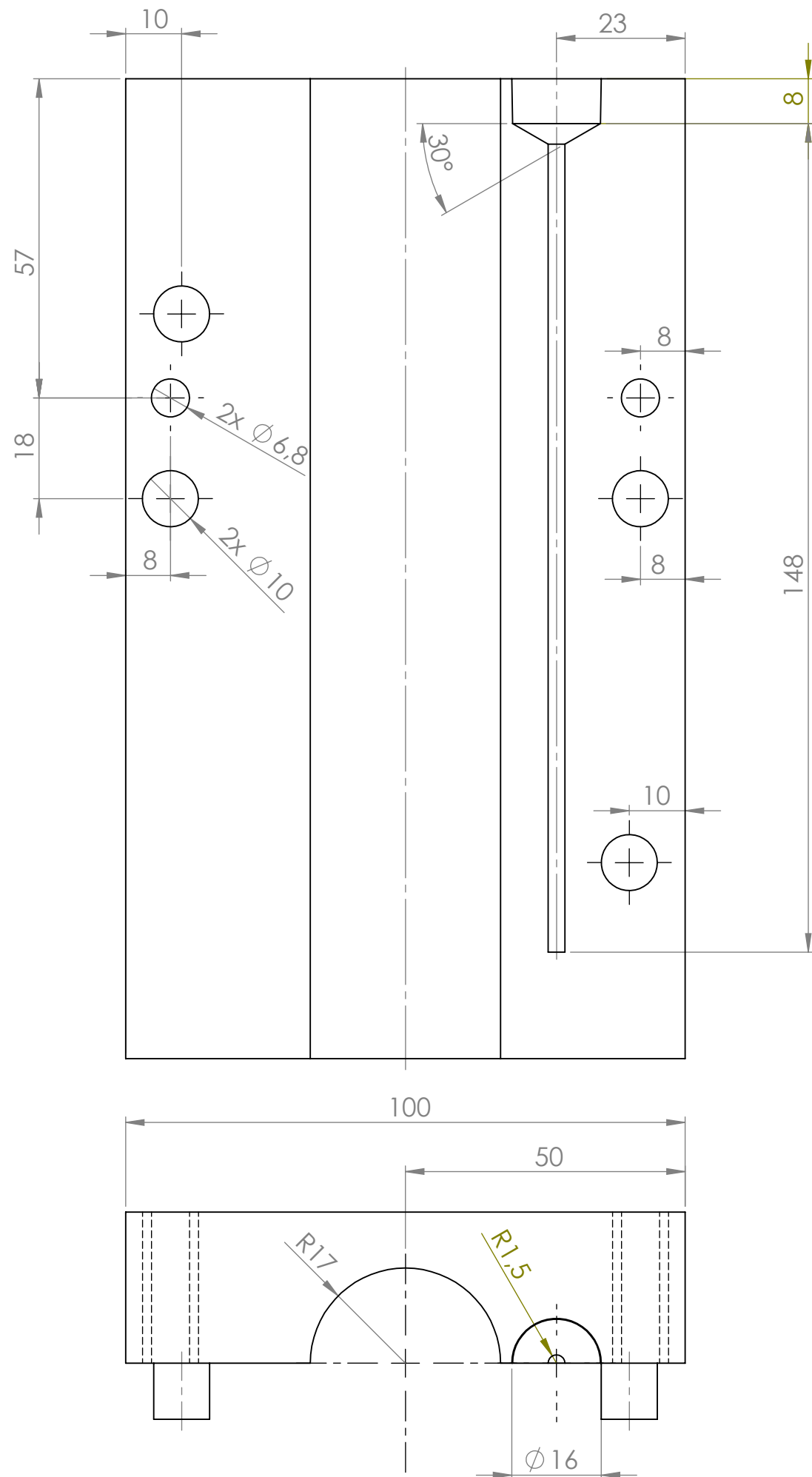
Tabela A.2- Propriedades dos diferentes tipos de bronze segundo as normas portuguesas NP 1206, e 1210.

| Tipo                    | Composição nominal (%)                     | Propriedades mecânicas |                          |                         |              | Fundição                |
|-------------------------|--|------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
|                         |  | Tensão de rutura (Mpa) | Tensão de cedência (Mpa) | Alongamento em 50 mm, % | Dureza ( HB) |                         |
| F-Cu-Sn 20              | 80 Cu, 20 Sn, 0.4 P <sub>máx</sub>         | 150                    | 140                      | 0                       | 170          | Em areia                |
| F-Cu-Sn 10              | 90 Cu, 10 Sn, 1.0 P <sub>máx</sub>         | 240                    | 120                      | 12                      | 70           | Em areia                |
|                         | 90 Cu, 10 Sn, 1.0 P <sub>máx</sub>         | 310                    | 150                      | 15                      | 90           | Centrifugada e contínua |
| F-Cu-Sn 10 Pb 10        | 80 Cu, 10 Sn, 10 Pb, 0.10 P <sub>máx</sub> | 180                    | 80                       | 7                       | 65           | Centrifugada e contínua |
|                         | 80 Cu, 10 Sn, 10 Pb, 0.10 P <sub>máx</sub> | 260                    | 160                      | 9                       | 80           | Em areia                |
| F-Cu-Sn 10 Zn 2         | 88 Cu, 10 Sn, 2 Zn, 0.10 P <sub>máx</sub>  | 240                    | 120                      | 12                      | 65           | Em areia                |
| F-Cu- Sn 5 Pb 5 Zn<br>5 | 85 Cu, 5 Sn, 5 Pb, 5 Zn                    | 200                    | 80                       | 12                      | 60           | Em areia e coquilha     |
|                         | 85 Cu, 5 Sn, 5 Pb, 5 Zn                    | 250                    | 90                       | 12                      | 65           | Centrifugada e contínua |
| F-Cu-Sn-p               | 88 Cu, 12 Sn, 0.3 P <sub>máx</sub>         | 263                    | 154                      | 5                       | 100          | Centrifugada e contínua |
|                         | 94 Cu, 6 Sn, 0.20 P <sub>máx</sub>         | 849                    |                          | 5                       |              | Vazado e extrudado      |

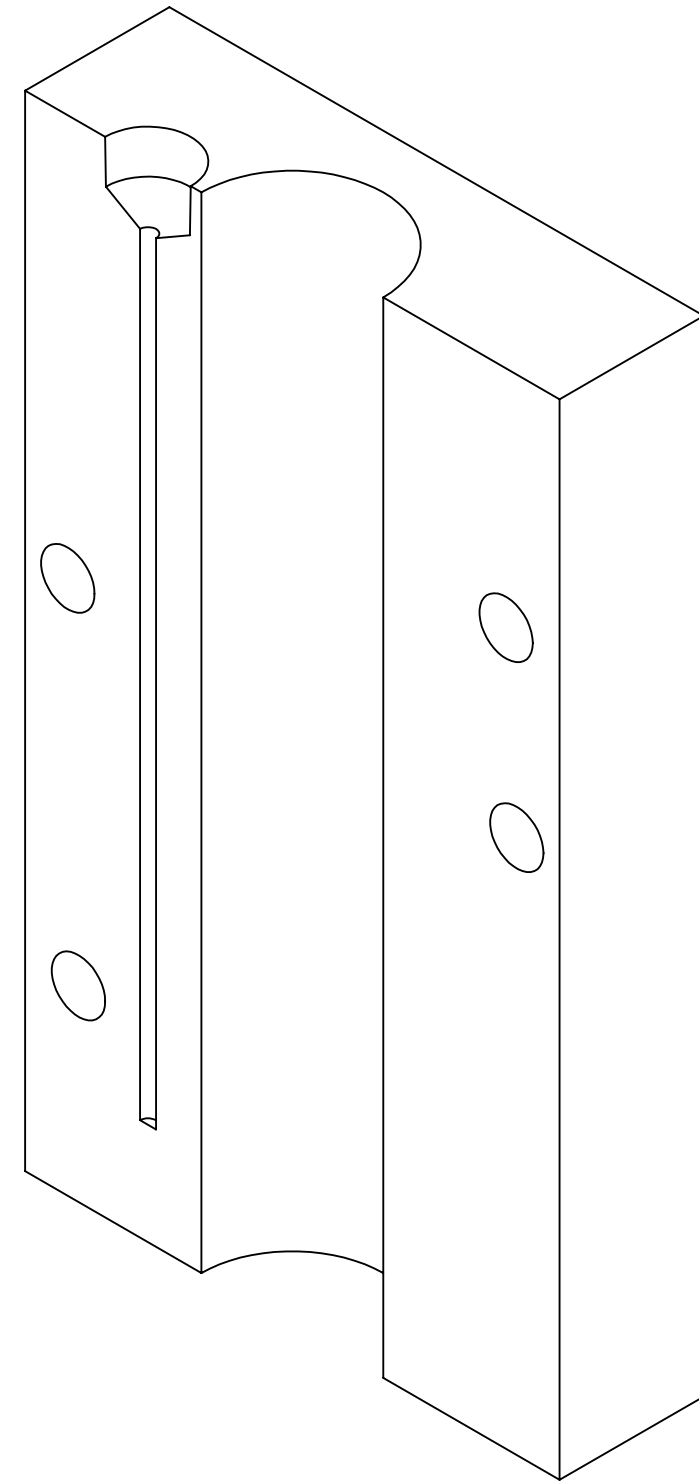
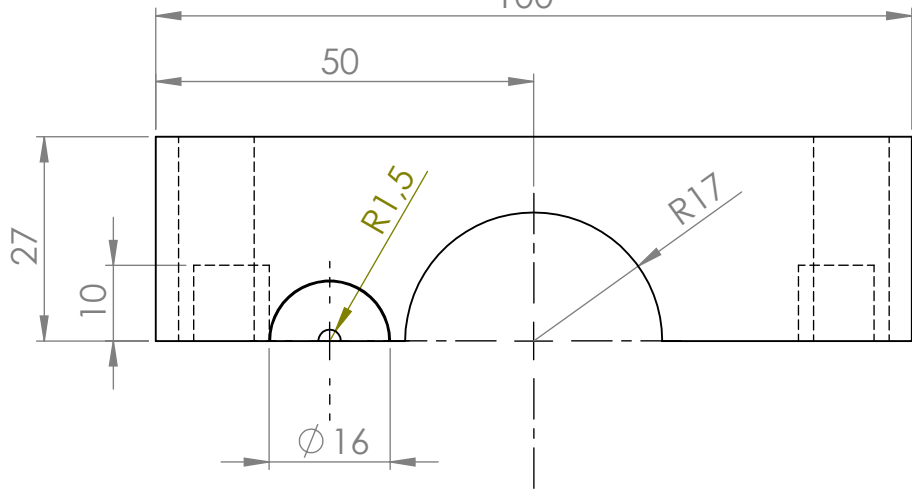


## **Anexo 2**

### **Anexo 2 - Desenho técnico da coquilha**



|   |            |  |           |         |            |                                   |         |                      |                        |          |              |  |
|---|------------|--|-----------|---------|------------|-----------------------------------|---------|----------------------|------------------------|----------|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS<br>SURFACE FINISH:<br>TOLERANCES:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |            |  |           | FINISH: |            | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES |         | DO NOT SCALE DRAWING |                        | REVISION |              |  |
|   |            |  |           |         |            |                                   |         | Uminho               |                        |          |              |  |
|   | NAME       |  | SIGNATURE |         | DATE       |                                   |         |                      | TITLE:<br><br>Coquilha |          |              |  |
| DRAWN   | João Braga |  |           |         | 01-11-2012 |                                   |         |                      |                        |          |              |  |
| CHK'D   |            |  |           |         |            |                                   |         |                      |                        |          |              |  |
| APPV'D  |            |  |           |         |            |                                   |         |                      |                        |          |              |  |
| MFG   |            |  |           |         |            |                                   |         |                      |                        |          |              |  |
| Q.A   |            |  |           |         |            | MATERIAL:                         |         | DWG NO.              |                        |          |              |  |
|   |            |  |           |         |            |                                   | 01      |                      | Parte 1                |          |              |  |
|   |            |  |           |         |            |                                   |         |                      | A3                     |          |              |  |
|   |            |  |           |         |            |                                   | WEIGHT: |                      | SCALE:1:1              |          | SHEET 1 OF 1 |  |



|   |  |            |  |            |  |                                   |  |                        |  |              |  |
|---|--|------------|--|------------|--|-----------------------------------|--|------------------------|--|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS<br>SURFACE FINISH:<br>TOLERANCES:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |  |            |  | FINISH:    |  | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES |  | DO NOT SCALE DRAWING   |  | REVISION     |  |
|   |  |            |  |            |  |                                   |  | Uminho                 |  |              |  |
| NAME  |  | SIGNATURE  |  | DATE       |  |                                   |  | TITLE:<br><br>Coquilha |  |              |  |
| DRAWN   |  | João Braga |  | 01-11-2012 |  |                                   |  |                        |  |              |  |
| CHK'D   |  |            |  |            |  |                                   |  |                        |  |              |  |
| APPV'D  |  |            |  |            |  |                                   |  |                        |  |              |  |
| MFG   |  |            |  |            |  |                                   |  |                        |  |              |  |
| Q.A   |  |            |  |            |  | MATERIAL:                         |  | DWG NO.                |  | A3           |  |
|   |  |            |  |            |  |                                   |  |                        |  |              |  |
|   |  |            |  |            |  |                                   |  |                        |  |              |  |
|   |  |            |  |            |  | WEIGHT:                           |  | SCALE: 1:2             |  | SHEET 1 OF 1 |  |

## **Anexo 3**

### **Anexo 3 - Microestrutura das amostras**

Em seguida são apresentadas as micrografias obtidas das amostras de teste.

#### Amostra 3 A

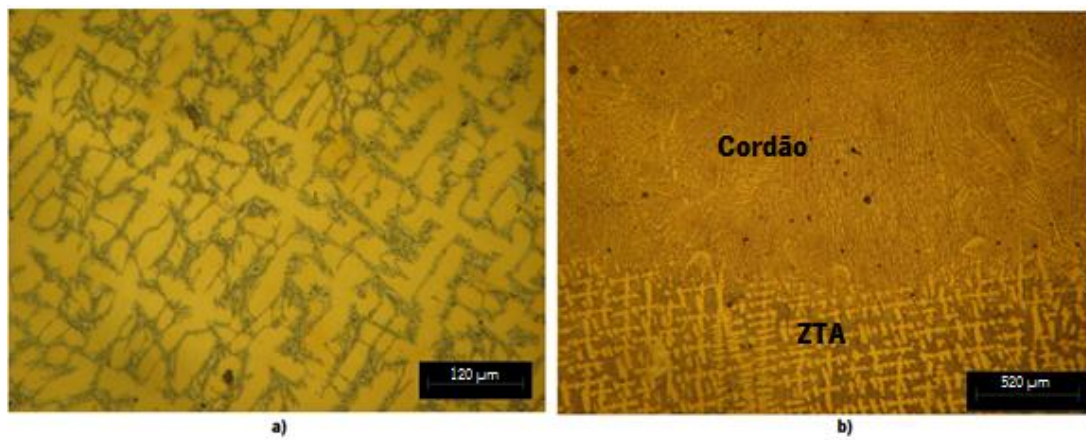


Figura A.1-Micrografias da amostra 3 A: a) MB; b) Transição Cordão para ZTA (na zona sem penetração).

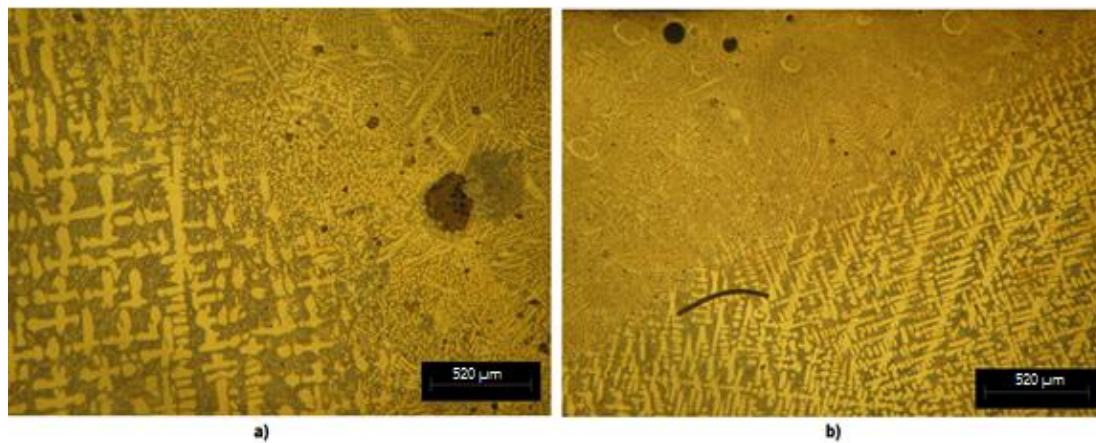


Figura A.2- Micrografias da amostra 3 A: a) Transição ZTA/cordão na zona 2; b) transição Cordão/ZTA na zona 4

#### Amostra 3 B

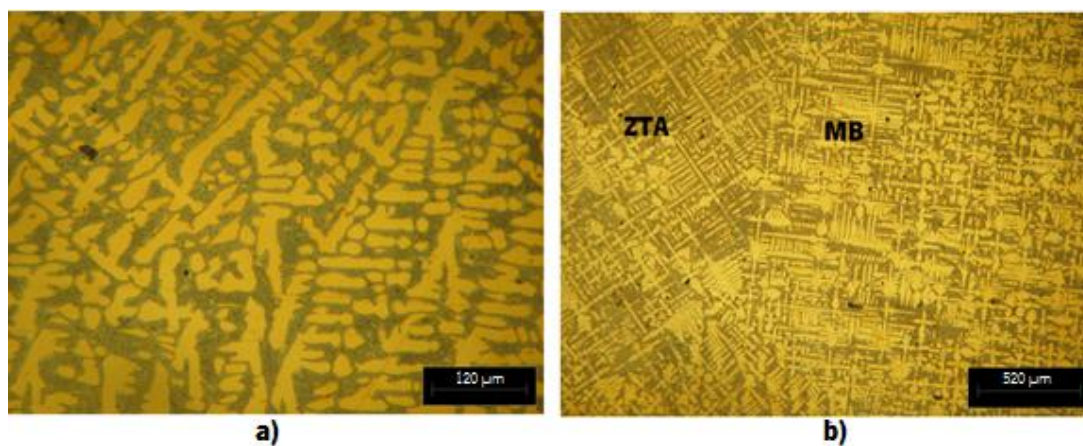


Figura A.3-Micrografias da amostra 3 B: a) MB; b) Transição ZTA/MB na zona 4



#### Amostra 4 A

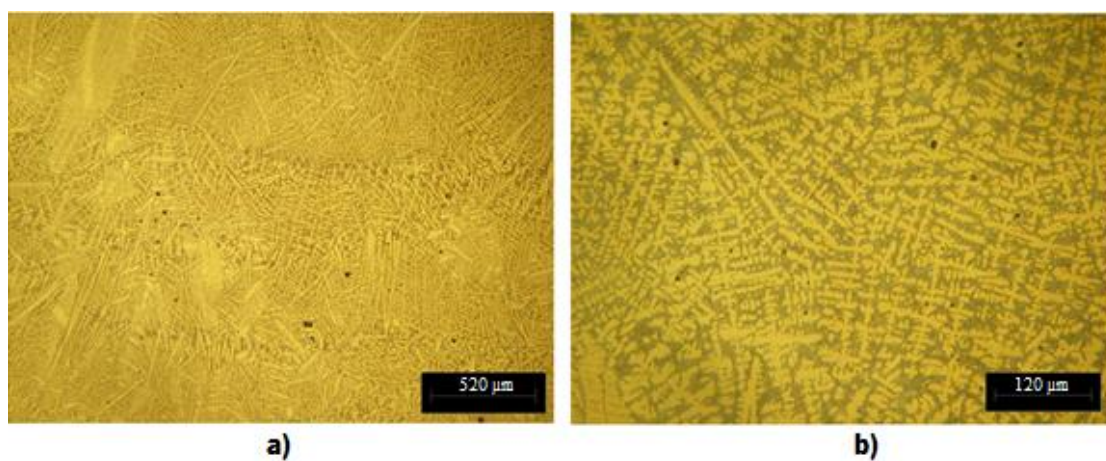


Figura A.4-Micrografias da amostra 4 A: a) Cordão; b) Cordão em maior ampliação

#### Amostra 4 B

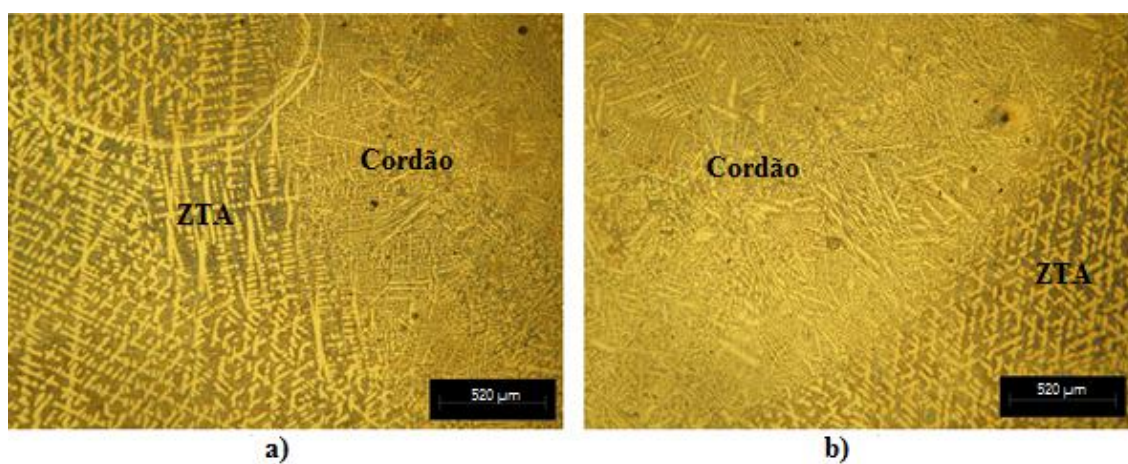


Figura A.5- Micrografias da amostra 4 B: a) Transição ZTA/cordão na zona 2; b) transição cordão/ZTA na zona 4

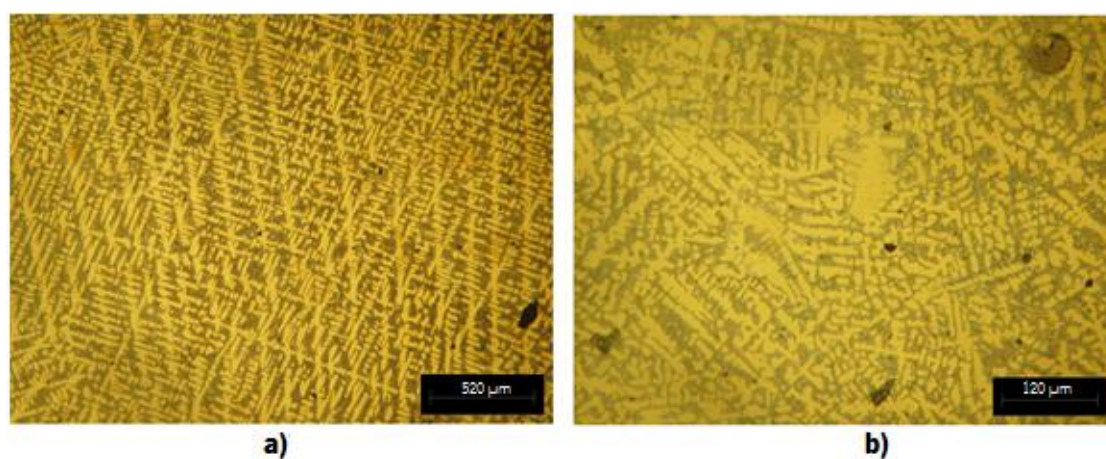


Figura A.6- Micrografias da amostra 4 B: a) MB na zona 1; b) cordão na zona 3 central

### Amostra 6 A

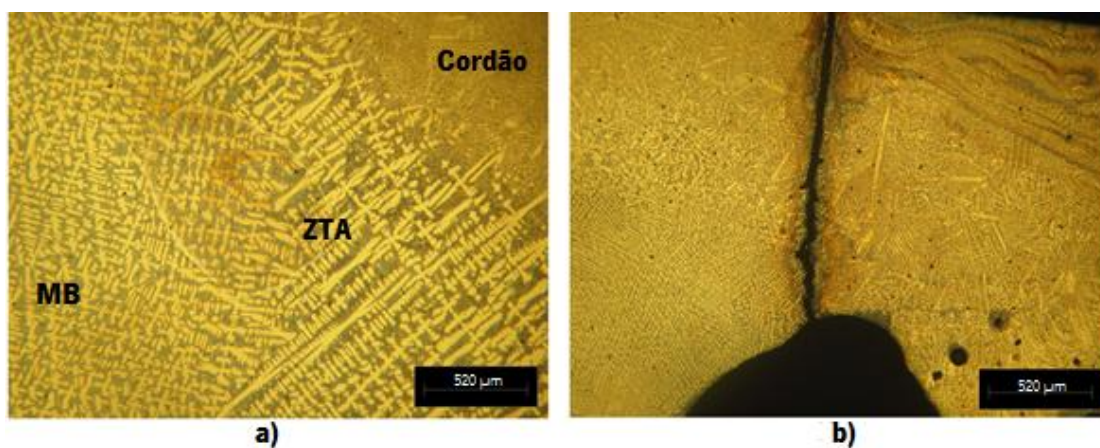


Figura A.7-Micrografias da amostra 6 A: a) Transição MB/ZTA/Cordão; b) Cordão

### Amostra 6 B

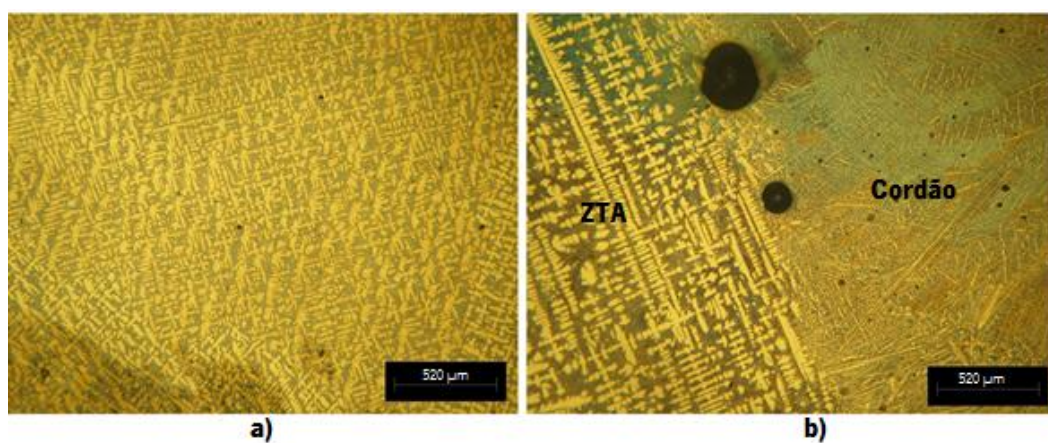


Figura A.8- Micrografias da amostra 6 B: a) MB na zona 1; b) Transição ZTA/cordão na zona 2.



### Amostra 7 A

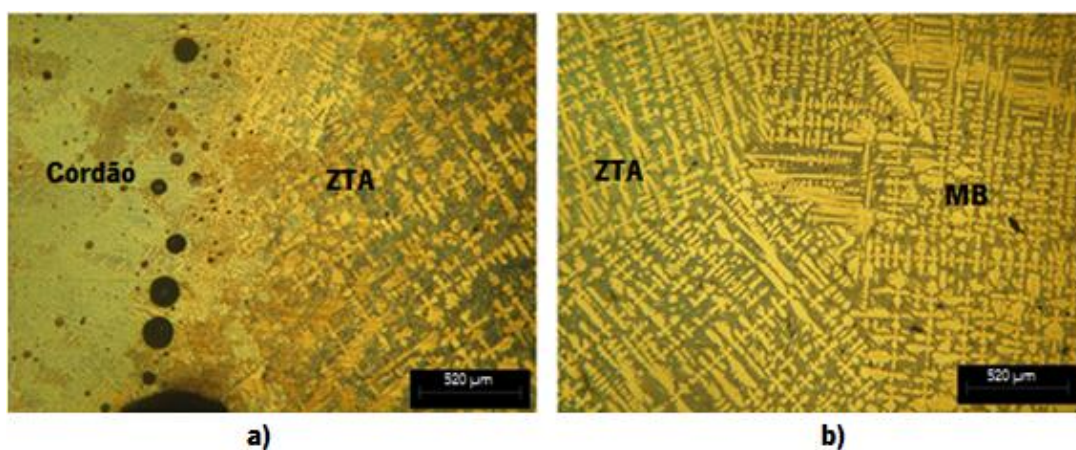


Figura A.9-Micrografias da amostra 7 A: a) transição do cordão/ZTA na zona 4; b) transição da ZTA/MB na zona 4 e

5

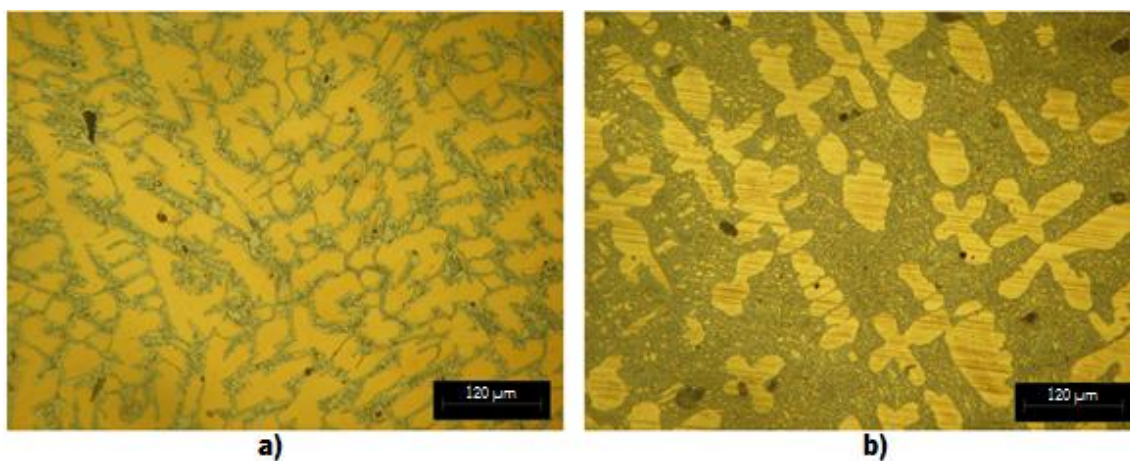


Figura A.10-Micrografias da amostra 7 A: a) MB na zona 1; b) ZTA na zona 4

### Amostra 7 B

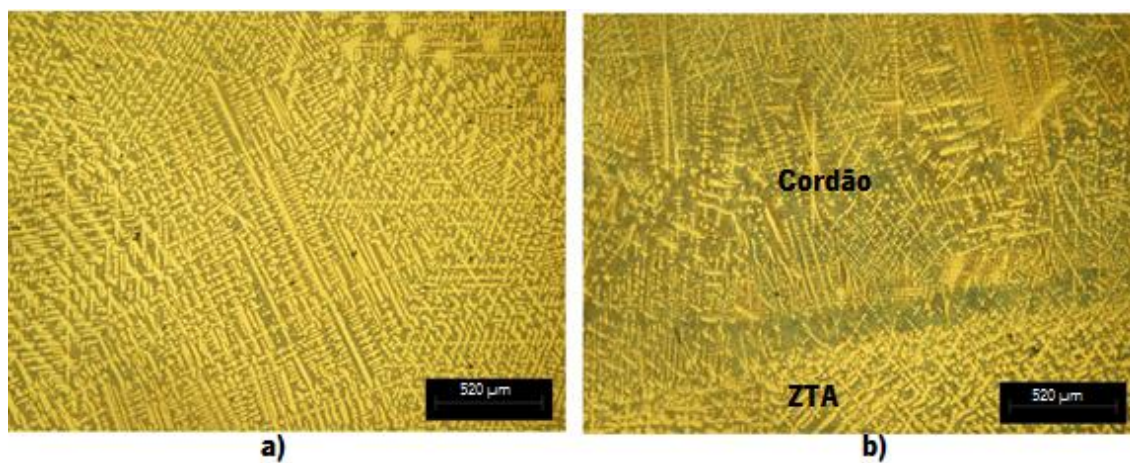


Figura A.11- Micrografias a amostra 7 B: a) MB na zona 1; b) Transição do cordão para a zona sem penetração



#### Amostra 8 A

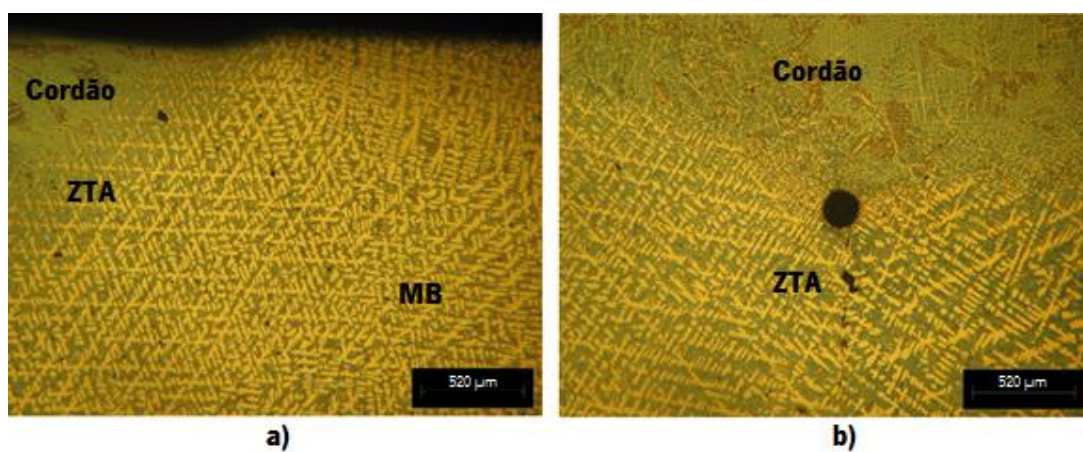


Figura A.12- Micrografias da amostra 8 A: a) transição cordão/ZTA e ZTA/MB na zona 3, 4 e 5; b) transição cordão/ZTA na zona sem penetração

#### Amostra 9 A

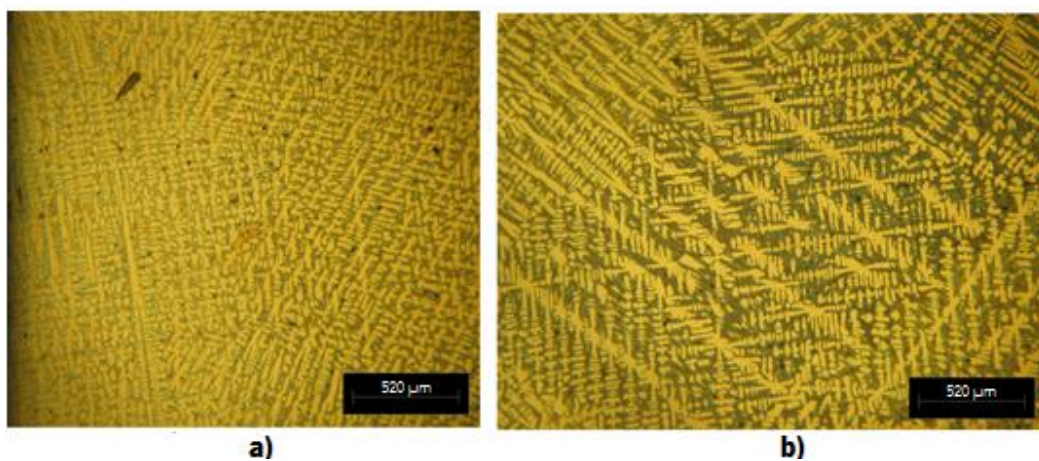


Figura A.13- Micrografias da amostra 9 A: a) MB na zona 1; b) ZTA na zona 2

Amostra 9 B

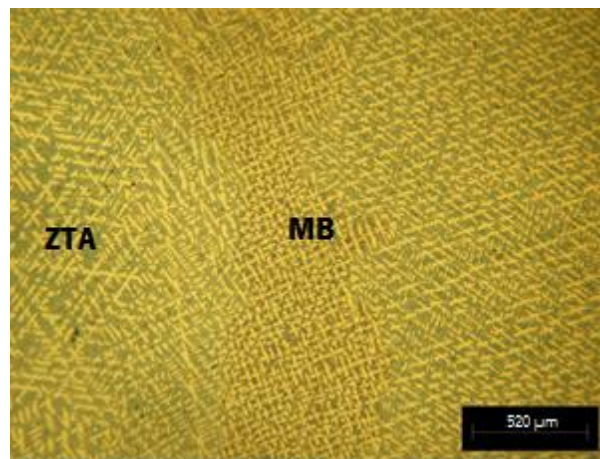


Figura A.14- Transição ZTA/MB na zona 4 e 5 da amostra 9 B

Amostra 10 A

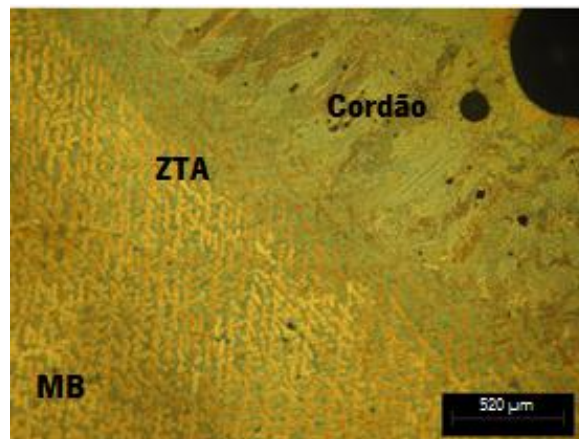


Figura A.15- Transição MB/ZTA e ZTA/cordão nas zonas 1, 2 e 3 da amostra 10 A.

### Amostra 10 B

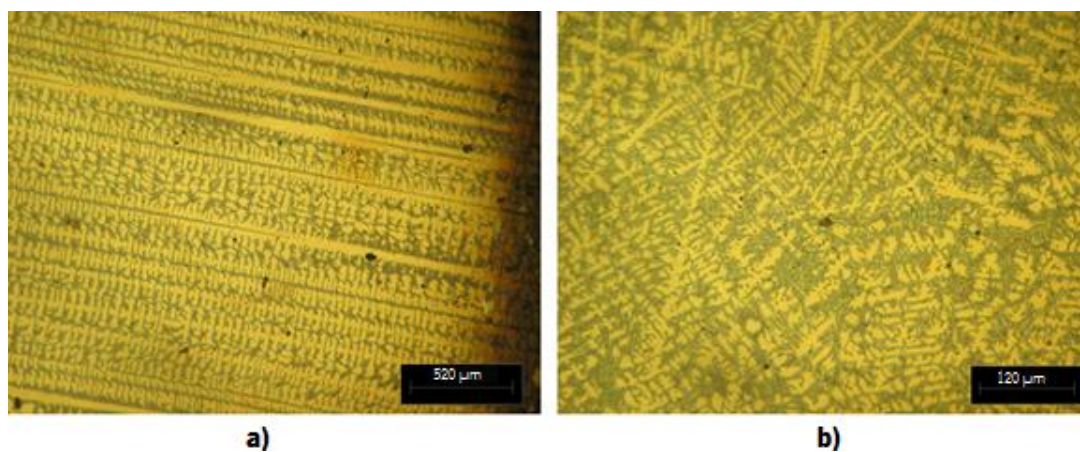


Figura A.16- Micrografias da amostra 10 B: a) MB na zona 5; b) cordão na zona 3 parte central

### Amostra 11 A

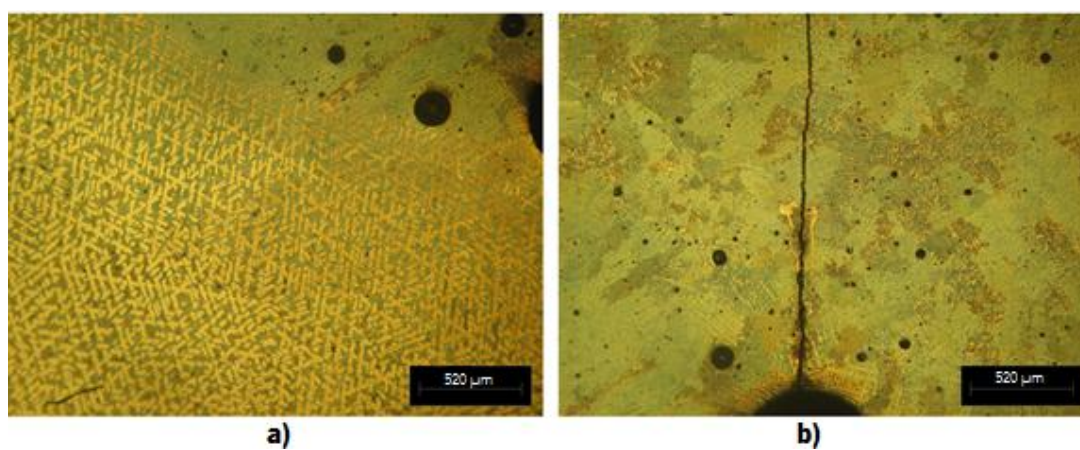


Figura A.17- Micrografias da amostra 11 A: a) transição MB/ZTA e ZTA/cordão; b) Cordão na parte superior.



Amostra 11 B

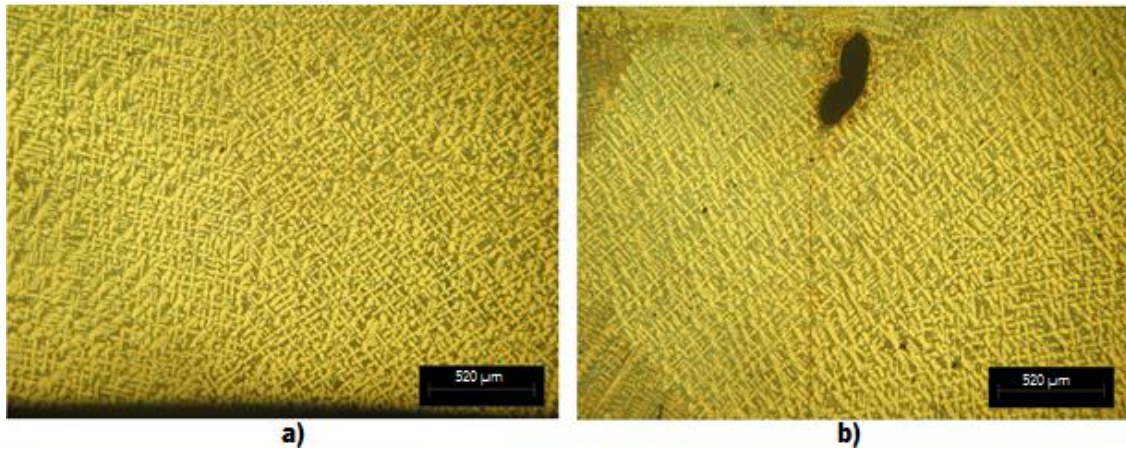


Figura A.18- Micrografia da amostra 11 B: a) MB na zona 1; b) Zona sem penetração.

## Anexo 4

### Anexo 4 - Durezas das amostras

Nas seguintes tabelas são apresentados os valores de todas as indentações efetuadas nas amostras de teste.

Tabela A.3- Valores de dureza da amostra 3 A

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 66,698 | 69,696 | 68,197 | 199          |
| 2        | 2     | 64,075 | 68,202 | 66,139 | 212          |
| 3        | 2     | 65,045 | 70,890 | 67,968 | 201          |
| 4        | 2     | 60,447 | 61,969 | 61,208 | 247          |
| 5        | 3     | 64,617 | 63,447 | 64,032 | 226          |
| 6        | 3     | 66,463 | 65,836 | 66,150 | 212          |
| 7        | 3     | 66,975 | 66,966 | 66,971 | 207          |
| 8        | 4     | 69,678 | 68,176 | 68,927 | 195          |
| 9        | 5     | 66,434 | 64,500 | 65,467 | 216          |
| 10       | 3     | 69,719 | 61,917 | 65,818 | 214          |
| 11       | 4     | 66,135 | 64,000 | 65,068 | 219          |
| 12       | 2     | 62,850 | 64,044 | 63,447 | 230          |
| 13       | 1     | 65,823 | 64,285 | 65,054 | 219          |
| 14       | 4     | 62,79  | 63,38  | 63,085 | 233          |
| 15       | 5     | 62,223 | 62,223 | 62,223 | 239          |
| 16       | 5     | 61,032 | 60,387 | 60,710 | 252          |
| 17       | 3     | 65,779 | 66,378 | 66,079 | 212          |
| 18       | 3     | 67,573 | 68,183 | 67,878 | 201          |

Tabela.A.4: Valores de dureza da amostra 3B

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (Hv) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 63,804 | 65,130 | 64,467 | 223          |
| 2        | 2     | 63,422 | 63,411 | 63,417 | 231          |
| 3        | 3     | 66,400 | 64,001 | 65,201 | 218          |
| 4        | 3     | 64,299 | 63,701 | 64,000 | 226          |
| 5        | 3     | 64,883 | 64,281 | 64,582 | 222          |
| 6        | 4     | 64,330 | 62,790 | 63,560 | 230          |
| 7        | 5     | 64,060 | 64,721 | 64,391 | 224          |
| 8        | 5     | 64,059 | 64,113 | 64,086 | 226          |
| 9        | 3     | 63,010 | 61,687 | 62,349 | 239          |
| 10       | 4     | 65,214 | 63,380 | 64,297 | 224          |
| 11       | 4     | 65,552 | 64,301 | 64,927 | 220          |
| 12       | 3     | 63,473 | 64,970 | 64,222 | 225          |
| 13       | 3     | 63,42  | 63,761 | 63,591 | 229          |
| 14       | 3     | 65,224 | 64,02  | 64,622 | 222          |

Tabela A.5- Valores de dureza da amostra 4 A

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 61,586 | 64,275 | 62,931 | 234          |
| 2        | 2     | 62,483 | 58,597 | 60,540 | 253          |
| 3        | 3     | 62,227 | 65,171 | 63,699 | 229          |
| 4        | 3     | 61,410 | 60,200 | 60,805 | 251          |
| 5        | 3     | 65,114 | 64,575 | 64,845 | 221          |
| 6        | 4     | 61,601 | 61,894 | 61,748 | 243          |
| 7        | 4     | 66,159 | 58,367 | 62,263 | 239          |
| 8        | 3     | 64,001 | 64,520 | 64,261 | 225          |
| 9        | 3     | 63,154 | 63,717 | 63,436 | 230          |
| 10       | 3     | 62,961 | 64,153 | 63,557 | 230          |
| 12       | 4     | 60,329 | 59,660 | 59,995 | 258          |
| 13       | 3     | 63,063 | 63,782 | 63,423 | 231          |
| 14       | 3     | 64,263 | 64,738 | 64,501 | 223          |
| 15       | 3     | 64,52  | 65,632 | 65,076 | 219          |

Tabela A.6- Valores de dureza da amostra 4 B

| Incisões | Zonas | d1       | d2      | D        | Durezas (HV) |
|----------|-------|----------|---------|----------|--------------|
| 1        | 1     | 64,905   | 69,970  | 67,438   | 204          |
| 2        | 2     | 72,345   | 59,670  | 66,008   | 213          |
| 3        | 3     | 63,380   | 63,079  | 63,230   | 232          |
| 4        | 3     | 64,573   | 65,182  | 64,878   | 220          |
| 5        | 3     | 65,768   | 65,470  | 65,619   | 215          |
| 6        | 3     | 64,579   | 63,986  | 64,283   | 224          |
| 7        | 3     | 65,470   | 66,324  | 65,897   | 214          |
| 8        | 4     | 63,377   | 61,885  | 62,631   | 236          |
| 9        | 5     | 65,768   | 66,366  | 66,067   | 212          |
| 10       | 3     | 63,402   | 65,195  | 64,299   | 224          |
| 11       | 3     | 63,977   | 63,992  | 63,985   | 226          |
| 12       | 3     | 63,978   | 62,201  | 63,090   | 233          |
| 13       | 4     | 62,2069  | 62,227  | 62,217   | 240          |
| 14       | 2     | 63,3769  | 64,576  | 63,976   | 227          |
| 15       | 3     | 65,12    | 62,181  | 63,651   | 229          |
| 16       | 3     |          |         | 0,000    |              |
| 17       | 3     | 64,575   | 64,575  | 64,575   | 222          |
| 18       | 3     | 63,42195 | 65,768  | 64,59498 | 222          |
| 19       | 2     | 63,977   | 62,805  | 63,391   | 231          |
| 20       | 2     | 69,358   | 67,6044 | 68,4812  | 198          |
| 21       | 2     | 53,82382 | 54,421  | 54,12241 | 317          |
| 22       | 5     | 63,975   | 65,182  | 64,5785  | 222          |

Tabela A.7- Valores de dureza da amostra 6 A.

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 63,701 | 66,101 | 64,901 | 220          |
| 2        | 2     | 59,551 | 56,879 | 58,215 | 274          |
| 3        | 3     | 63,198 | 64,430 | 63,814 | 228          |
| 4        | 3     | 63,855 | 64,374 | 64,115 | 226          |
| 5        | 4     | 62,918 | 62,601 | 62,760 | 235          |
| 6        | 5     | 63,658 | 65,346 | 64,502 | 223          |
| 7        | 4     | 73,696 | 71,887 | 72,792 | 175          |
| 8        | 4     | 66,263 | 68,981 | 67,622 | 203          |
| 9        | 5     |        |        |        |              |
| 10       | 2     | 61,818 | 65,942 | 63,880 | 227          |
| 11       | 1     | 65,564 | 64,201 | 64,883 | 220          |
| 12       | 3     | 64,524 | 64,474 | 64,499 | 223          |
| 13       | 3     | 63,582 | 63,281 | 63,432 | 230          |
| 14       | 3     | 61,636 | 62,142 | 61,889 | 242          |
| 15       | 5     | 68,35  | 69,184 | 68,767 | 196          |

Tabela A.8- Valores de dureza da amostra 6 B.

| Incisões | Zonas | d1      | d2      | D       | Durezas (HV) |
|----------|-------|---------|---------|---------|--------------|
| 1        | 1     | 66,377  | 63,422  | 64,900  | 220          |
| 2        | 2     | 65,779  | 64,575  | 65,177  | 218          |
| 3        | 3     | 61,889  | 62,193  | 62,041  | 241          |
| 4        | 3     | 64,308  | 64,905  | 64,607  | 222          |
| 5        | 3     | 61,917  | 61,302  | 61,610  | 244          |
| 6        | 4     | 52,345  | 53,525  | 52,935  | 331          |
| 7        | 5     | 59,808  | 62,520  | 61,164  | 248          |
| 8        | 3     | 77,138  | 78,931  | 78,034  | 152          |
| 9        | 3     | 64,276  | 63,682  | 63,979  | 227          |
| 10       | 2     | 66,377  | 67,565  | 66,971  | 207          |
| 11       | 1     | 64,575  | 64,280  | 64,428  | 223          |
| 12       | 2     | 62,201  | 62,790  | 62,496  | 237          |
| 13       | 2     | 56,508  | 55,007  | 55,758  | 298          |
| 14       | 5     | 59,51   | 63,693  | 61,602  | 244          |
| 15       | 4     | 60,234  | 60,8305 | 60,532  | 253          |
| 16       | 4     | 170,143 | 178,203 | 174,173 | 31           |
| 17       | 2     | 62,035  | 62,925  | 62,480  | 238          |



Tabela A.9- Valores de dureza da amostra 7 A.

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 63,676 | 62,082 | 62,879 | 235          |
| 2        | 2     | 66,671 | 63,378 | 65,025 | 219          |
| 3        | 3     | 64,573 | 63,981 | 64,277 | 224          |
| 4        | 3     | 74,139 | 74,361 | 74,250 | 168          |
| 5        | 4     | 57,999 | 64,878 | 61,439 | 246          |
| 6        | 5     |        |        | 0,000  |              |
| 7        | 5     | 63,975 | 65,468 | 64,722 | 221          |
| 8        | 4     | 67,266 | 69,255 | 68,261 | 199          |
| 9        | 3     | 66,668 | 66,671 | 66,670 | 209          |
| 10       | 3 e 4 | 69,366 | 71,170 | 70,268 | 188          |
| 11       | 2     | 57,111 | 57,700 | 57,406 | 281          |

Tabela .A.10- Valores de dureza da amostra 7 B.

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 62,289 | 66,671 | 64,480 | 223          |
| 2        | 2     | 63,679 | 64,573 | 64,126 | 225          |
| 3        | 3     | 59,790 | 59,790 | 59,790 | 259          |
| 4        | 3     | 59,192 | 58,798 | 58,995 | 266          |
| 5        | 3     | 61,285 | 61,889 | 61,587 | 244          |
| 6        | 4     | 65,768 | 62,483 | 64,126 | 225          |
| 7        | 5     | 65,173 | 64,889 | 65,031 | 219          |
| 8        | 3     | 63,986 | 61,583 | 62,785 | 235          |
| 9        | 4     | 64,579 | 63,278 | 63,929 | 227          |
| 10       | 2     | 61,885 | 62,480 | 62,183 | 240          |
| 11       | 3     | 60,089 | 59,494 | 59,792 | 259          |
| 12       | 3     | 58,893 | 58,002 | 58,448 | 271          |

Tabela .A.11- valor de durezas da amostra 8 A.

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 62,779 | 62,182 | 62,481 | 238          |
| 2        | 2     | 58,295 | 59,789 | 59,042 | 266          |
| 3        | 3     | 60,400 | 57,999 | 59,200 | 265          |
| 4        | 3     | 58,301 | 59,490 | 58,896 | 267          |
| 5        | 3     | 59,191 | 59,790 | 59,491 | 262          |
| 6        | 4     | 70,853 | 67,563 | 69,208 | 194          |
| 7        | 5     | 62,182 | 62,782 | 62,482 | 237          |

|    |   |        |        |        |     |
|----|---|--------|--------|--------|-----|
| 8  | 5 | 63,378 | 63,978 | 63,678 | 229 |
| 9  | 4 | 63,078 | 61,885 | 62,482 | 238 |
| 10 | 2 | 61,284 | 58,300 | 59,792 | 259 |
| 11 | 3 | 62,182 | 62,780 | 62,481 | 238 |
| 12 | 3 | 60,388 | 60,387 | 60,388 | 254 |
| 13 | 3 | 58,595 | 58,593 | 58,594 | 270 |

Tabela A.12- Valores de dureza da amostra 8 B.

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 64,660 | 64,955 | 64,808 | 221          |
| 2        | 2     | 62,586 | 64,378 | 63,482 | 230          |
| 3        | 3     | 61,420 | 60,847 | 61,133 | 248          |
| 4        | 3     | 62,903 | 61,723 | 62,313 | 239          |
| 5        | 3     | 62,583 | 61,403 | 61,993 | 241          |
| 6        | 4     | 62,010 | 60,233 | 61,121 | 248          |
| 7        | 5     | 63,469 | 63,402 | 63,436 | 230          |
| 8        | 3     | 59,929 | 60,222 | 60,075 | 257          |
| 9        | 2     | 65,264 | 62,895 | 64,080 | 226          |
| 10       | 4     | 62,594 | 62,010 | 62,302 | 239          |
| 11       | 3     | 59,933 | 61,413 | 60,673 | 252          |
| 12       | 3     | 62,305 | 59,067 | 60,686 | 252          |

Tabela .A.13- Valores de dureza da amostra 9 A

| Incisão | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|---------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1       | 1     | 62,790 | 67,562 | 65,176 | 218          |
| 2       | 2     | 57,998 | 60,997 | 59,498 | 262          |
| 3       | 3     | 63,382 | 64,878 | 64,130 | 225          |
| 4       | 3     | 63,380 | 63,675 | 63,528 | 230          |
| 5       | 3     | 62,193 | 62,010 | 62,102 | 240          |
| 6       | 4     | 58,905 | 61,883 | 60,394 | 254          |
| 7       | 5     | 66,370 | 67,017 | 66,694 | 208          |
| 8       | 3     | 64,274 | 64,274 | 64,274 | 224          |
| 9       | 5     | 64,769 | 63,120 | 63,945 | 227          |
| 10      | 4     | 62,181 | 67,573 | 64,877 | 220          |
| 11      | 3     | 63,380 | 62,227 | 62,804 | 235          |
| 12      | 3     | 63,084 | 64,276 | 63,680 | 229          |
| 13      | 3     | 65,214 | 63,388 | 64     | 224          |

Tabela A.14- Valores de dureza da amostra 9 B

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 62,181 | 61,609 | 61,895 | 242          |
| 2        | 2     | 61,61  | 62,805 | 62,208 | 240          |
| 3        | 3     | 65,487 | 63,710 | 64,599 | 222          |
| 4        | 3     | 66,572 | 67,273 | 66,923 | 207          |
| 5        | 4     | 67,001 | 65,503 | 66,252 | 211          |
| 6        | 5     | 64,009 | 66,391 | 65,200 | 218          |
| 7        | 3     | 64,915 | 64,617 | 64,766 | 221          |
| 8        | 3     | 66,377 | 63,402 | 64,890 | 220          |
| 9        | 3     | 64,617 | 63,422 | 64,020 | 226          |
| 10       | 2     | 65,503 | 66,590 | 66,047 | 213          |
| 11       | 1     | 64,905 | 64,607 | 64,756 | 221          |
| 12       | 1     | 57,119 | 63,402 | 60,261 | 255          |

Tabela A.15- Valores de dureza da amostra 10 A

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 66,538 | 66,067 | 66,303 | 211          |
| 2        | 2     | 64,474 | 64,551 | 64,513 | 223          |
| 3        | 3     | 61,059 | 60,776 | 60,918 | 250          |
| 4        | 3     | 56,267 | 56,879 | 56,573 | 290          |
| 5        | 3     | 61,032 | 61,908 | 61,470 | 245          |
| 6        | 4     | 63,123 | 62,850 | 62,987 | 234          |
| 7        | 5     | 67,972 | 66,538 | 67,255 | 205          |
| 8        | 4     | 62,440 | 68,647 | 65,544 | 216          |
| 9        | 2     | 60,554 | 60,576 | 60,565 | 253          |
| 10       | 1     | 65,513 | 63,112 | 64,313 | 224          |

Tabela A.16- Valores de dureza da amostra 10 B

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 61,296 | 63,710 | 62,503 | 237          |
| 2        | 2     | 61,287 | 62,790 | 62,039 | 241          |
| 3        | 3     | 62,193 | 61,004 | 61,599 | 244          |
| 4        | 3     | 58,905 | 59,796 | 59,351 | 263          |
| 5        | 4 e 3 | 63,402 | 63,402 | 63,402 | 231          |
| 6        | 4     | 61,610 | 64,584 | 63,097 | 233          |
| 7        | 5     | 63,992 | 63,411 | 63,702 | 228          |
| 8        | 3     | 60,997 | 61,595 | 61,296 | 247          |
| 9        | 3     | 62,491 | 63,380 | 62,936 | 234          |
| 10       | 5     | 68,160 | 63,986 | 66,073 | 212          |

|    |   |        |        |        |     |
|----|---|--------|--------|--------|-----|
| 11 | 4 | 63,394 | 63,710 | 63,552 | 230 |
| 12 | 1 | 65,494 | 64,874 | 65,184 | 218 |
| 13 | 3 | 64,59  | 63,71  | 64,150 | 225 |

Tabela A.17- Valores de dureza da amostra 11 A

| Incisões | Zonas  | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        |        |        |        |        |              |
| 2        | 2      | 63,282 | 58,070 | 60,676 | 252          |
| 3        | 3      | 56,879 | 58,743 | 57,811 | 277          |
| 4        | 3      | 56,565 | 60,532 | 58,549 | 270          |
| 5        | 4      | 60,110 | 62,230 | 61,170 | 248          |
| 6        | 4      | 57,177 | 59,319 | 58,248 | 273          |
| 7        | 5 ou 4 | 61,320 | 67,135 | 64,228 | 225          |
| 8        | 5      | 63,813 | 64,940 | 64,377 | 224          |
| 9        | 4      | 59,283 | 59,957 | 59,620 | 261          |
| 10       | 2      | 63,777 | 63,198 | 63,488 | 230          |
| 11       | 1      | 64,672 | 65,836 | 65,254 | 218          |
| 12       | 3      | 62,241 | 62,322 | 62,281 | 239          |

Tabela A.18- Valores de dureza da amostra 11 B

| Incisões | Zonas | d1     | d2     | D      | Durezas (HV) |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------------|
| 1        | 1     | 61,285 | 63,208 | 62,247 | 239          |
| 2        | 2     | 63,173 | 65,173 | 64,173 | 225          |
| 3        | 3     | 64,059 | 60,414 | 62,237 | 239          |
| 4        | 3     | 60,690 | 58,600 | 59,645 | 261          |
| 5        | 4     | 64,274 | 65,470 | 64,872 | 220          |
| 6        | 5     | 63,383 | 63,378 | 63,381 | 231          |
| 7        | 5     |        |        |        |              |
| 8        | 4     | 62,779 | 64,227 | 63,503 | 230          |
| 9        | 2     | 63,677 | 63,682 | 63,680 | 229          |
| 10       | 1     | 66,073 | 63,378 | 64,726 | 221          |
| 11       | 3     | 58,594 | 58,893 | 58,744 | 269          |
| 12       | 3     | 58,295 | 59,193 | 58,744 | 269          |